



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ II: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ: Ο ΡΟΛΟΣ
ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΝΤΕ ΜΠΡΙΤΟ - ΚΑΡΑΓΙΩΡΓΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΓΙΩΡΓΟΣ ΜΑΥΡΩΤΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στην σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου την περίοδο 2012 - 2013. Η θεματική ενότητα της μελέτης εντάσσεται στον τομέα της Βιομηχανικής και Ενεργειακής Οικονομίας.

Στόχος της εργασίας είναι η εφαρμογή του μαθηματικού προγραμματισμού για την μελέτη και την βελτιστοποίηση κτιριακής εγκατάστασης με δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας.

Με την ολοκλήρωση της συγγραφής, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Μαυρωτά για την άριστη συνεργασία μας και συνεχή καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της μελέτης αυτής αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε ώστε να διευρύνω τις γνώσεις μου στον τομέα αυτό.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση της αποθήκευσης θερμότητας είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία η οποία αρχίζει να εφαρμόζεται ευρύτερα σε διάφορων ειδών κτιριακές εγκαταστάσεις. Αρχικά, στην εργασία αυτή γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στις διάφορες τεχνολογίες που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση της θερμότητας. Ειδικότερα όμως, η εργασία αυτή έχει ως στόχο να μελετήσει ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σε κτιριακή εγκατάσταση η οποία χρησιμοποιεί σύστημα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικού ρεύματος για την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών της.

Η μελέτη αυτή γίνεται αφού μοντελοποιηθεί το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και με τις κατάλληλες παραδοχές και περιορισμούς απλοποιηθεί σε μαθηματικές εξισώσεις. Στην συνέχεια γίνεται χρήση του γραμμικού προγραμματισμού ο οποίος αποτελεί ένα ιδιαίτερο και χρήσιμο εργαλείο για τον υπολογισμό του βέλτιστου τρόπου λειτουργίας του συστήματος, δηλαδή στην εύρεση των κατάλληλων τιμών που πρέπει να λάβουν οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου. Συγκεκριμένα, το αποτέλεσμα έδειξε χρησιμοποιώντας τον βέλτιστο τρόπο λειτουργίας, η χρήση της αποθήκευσης θερμότητας είναι ιδιαίτερα αποδοτική και από ενεργειακή αλλά και από οικονομική άποψη.

Η περαιτέρω μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος γίνεται με την ανάλυση ρίσκου με την βοήθεια της μεθόδου Monte Carlo ώστε να βρεθεί ο βαθμός ευαισθησίας του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγονται ορισμένες μεταβλητές οι οποίες θεωρούνται αβέβαιες ως προς την τιμή τους και εξετάζεται το κατά πόσο μία αυξομείωση σε αυτές, επηρεάζει κάποιες άλλες όπως για παράδειγμα το συνολικό κόστος. Η ανάλυση έδειξε επιθυμητά και αναμενόμενα αποτελέσματα για την ευαισθησία του συστήματος αυτού.

Αφού έγιναν οι διάφοροι υπολογισμοί, παρουσιάζονται αναλυτικά σε διαγράμματα όλα τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης και εξάγονται τα πιο σημαντικά γενικά συμπεράσματα σχετικά με τα διάφορα χαρακτηριστικά του συστήματος αλλά και τον τρόπο λειτουργίας του. Η αποθήκευση θερμότητας σε κτιριακές εγκαταστάσεις, φαίνεται πως αποτελεί μια ιδιαίτερη ελκυστική επιλογή.

ABSTRACT

The use of thermal energy storage is a relatively new technology which is beginning to become more widely applied into various types of buildings. Initially, this work introduces a literature review with various types of technologies that may be used for thermal energy storage. In specific, this work aims to study the technology of thermal energy storage in buildings combined with the use of a cogeneration system that produces heat and electrical power to meet the building's energy needs.

In this study, firstly, the thermal energy storage system is modeled. Furthermore, appropriate assumptions and limitations are taken into consideration in order to have some simplified mathematical equations. Then, we make use of linear programming, which is a unique and useful tool for calculating the optimum operational mode of the system. That means to find the appropriate values that the decision variables of the model should take. Specifically, the result showed that by using the thermal energy storage system into the optimal operation mode, the whole system becomes highly efficient in economical and energy terms.

A further study of the behavior of the system requires risk analysis to be made with the help of Monte Carlo simulation in order to find the sensitivity of the system. Specifically, some variables are selected and considered to have uncertain values. These variables are examined in order to find whether a fluctuation on their values affect other variables such as the overall cost. The analysis showed some desirable and expected results for the sensitivity of this system.

After having made various calculations, all the results of this analysis are presented in charts by detail. Then, some general conclusions are made about the most important facts and features of the system related with the way it works. The thermal energy storage in buildings, seems to be a particularly attractive option.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----------|
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 12 |
| 2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΤΙΡΙΩΝ..... | 14 |
| 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ..... | 14 |
| 2.2 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ..... | 15 |
| 2.2.1 Γενικά..... | 15 |
| 2.2.2 Αποθήκευση σε δεξαμενές..... | 17 |
| 2.2.2.1 Δεξαμενές υγρών (water tanks)..... | 17 |
| 2.2.2.2 Θερμική κλίση στερεών (rock beds)..... | 18 |
| 2.2.3 Αποθήκευση στο έδαφος..... | 19 |
| 2.2.3.1 Αποθήκευση Θερμότητας σε υδροφόρα στρώματα (ATES)..... | 20 |
| 2.2.3.2 Αποθήκευση Θερμότητας σε γεωτρήσεις (BTES)..... | 20 |
| 2.2.3.3 Αποθήκευση Θερμότητας σε σπηλιές (CTES)..... | 21 |
| 2.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ..... | 21 |
| 2.3.1 Εισαγωγή..... | 21 |
| 2.3.2 Λανθάνουσα θερμότητα..... | 22 |
| 2.3.2.1 Γενικά..... | 22 |
| 2.3.2.2 Αποθήκευση θερμότητας..... | 22 |
| 2.3.2.3 Χωρητικότητα αποθήκευσης..... | 24 |
| 2.3.3 Υλικά αλλαγής φάσης (PCM)..... | 24 |
| 2.3.3.1 Γενικά..... | 24 |
| 2.3.3.2 Ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης..... | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.4 Κατηγοριοποίηση υλικών αλλαγής φάσης..... | 27 |
| 2.3.4.1 Γενικά..... | 27 |
| 2.3.4.2 Οργανικά PCM..... | 28 |
| 2.3.4.2.1 Παραφίνες..... | 28 |
| 2.3.4.2.2 Μη παραφίνες..... | 29 |
| 2.3.4.3 Ανόργανα PCM..... | 29 |
| 2.3.4.3.1 Ένυδρα άλατα..... | 29 |
| 2.3.4.3.2 Μεταλλικά..... | 30 |
| 2.3.4.4 Εύτηκτα PCM..... | 30 |
| 2.3.5 Θερμική αποθήκη με υλικά αλλαγής φάσης..... | 31 |
| 2.4 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΧΗΜΙΚΩΝ | |
| ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ..... | 33 |
| 2.4.1 Εισαγωγή..... | 33 |
| 2.4.2 Θερμοχημική αποθήκευση ενέργειας..... | 33 |
| 2.4.3 Βασικές αρχές της θερμοχημικής αποθήκευσης θερμότητας...36 | |
| 2.4.4 Θερμοχημικά υλικά (TCM)..... | 37 |
| 2.4.5 Σύγκριση της θερμοχημικής αποθήκευσης θερμότητας με άλλους τρόπους αποθήκευσης θερμότητας..... | 38 |
| 2.5 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΡΟΦΗΣΗΣ..... | 40 |
| 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ..... | 42 |
| 3.1 ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ..... | 42 |
| 3.1.1 Γενικά..... | 42 |
| 3.1.2 Μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού..... | 43 |
| 3.1.3 Είδη γραμμικού προγραμματισμού..... | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1.4 Η μέθοδος SIMPLEX..... | 45 |
| 3.1.5 Η γλώσσα GAMS..... | 45 |
| 3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕ CARLO ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ..... | 47 |
| Η προσομοίωση Monte Carlo..... | 47 |
| 4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ..... | 50 |
| 5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ..... | 52 |
| 5.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ, ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ..... | 52 |
| 5.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ..... | 60 |
| 5.2.1 Αντικειμενική συνάρτηση..... | 60 |
| 5.2.2 Όρια χωρητικότητας, περιορισμοί της παραγωγής, εξισώσεις ισορροπίας..... | 61 |
| 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | 66 |
| 6.1 ΧΡΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ..... | 66 |
| 6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΟΝΤΕ CARLO..... | 72 |
| 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 82 |
| 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 86 |
| 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ..... | 88 |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή ασχολείται με την μοντελοποίηση ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας και την εφαρμογή του γραμμικού προγραμματισμού με σκοπό την γενικότερη μελέτη της συμπεριφοράς του ίδιου του συστήματος σε οικονομικούς όρους και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με αυτό. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται η μελέτη ενός μεγάλου κτιριακού συγκροτήματος 5000 κατοικιών το οποίο χρησιμοποιεί μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας για την ικανοποίηση των αναγκών σε ψύξη, θέρμανση και ΖΝΧ(Ζεστών Νερών Χρήσης).

Ολόκληρη η εργασία αυτή βασίστηκε και είχε ως κύρια πηγή την επιστημονική δημοσίευση των Miguel A. Lozano, Jose C. Ramos, Luis M. Serra με τίτλο "Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power)systems under legal constraints" [1], οι οποίοι έχουν ασχοληθεί εκτενώς με την μοντελοποίηση συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας σε εφαρμογές μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων τα οποία χρησιμοποιούν συμπαραγωγή ενέργειας. Επίσης, επειδή η μοντελοποίηση είναι μια δύσκολη διαδικασία, για τον ακριβή και σωστό τρόπο μοντελοποίησης ακολουθήθηκε μεθοδολογία η οποία περιγράφεται στην δημοφιλή επιστημονική δημοσίευση των Iyer, R.R., Grossmann με τίτλο "Synthesis and operational planning of utility systems for multiperiod operation" [2]. Συμπληρώνοντας, παρόμοιες αναλύσεις έχουν γίνει από τους George Mavrotas, Danae Diakoulaki, Kostas Florios, Paraskevas Georgiou με τίτλο " A mathematical programming framework for energy planning in services' sector buildings under uncertainty in load demand: The case of a hospital in Athens" [3], από τους George Mavrotas, Kostas Florios, Dimitra Vlachou με τίτλο " Energy planning of a hospital using Mathematical Programming and Monte Carlo simulation for dealing with uncertainty in the economic parameters" [4] αλλά και από τον Mohammad Saad Al-Homoud με τίτλο "Computer-aided building energy analysis techniques" [5].

Στην εργασία γίνεται εφαρμογή του γραμμικού προγραμματισμού και ειδικότερα του μικρού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού καθώς κρίνεται κατάλληλος για τα δεδομένα της συγκεκριμένης εφαρμογής. Το ίδιο ισχύει και για την επιλογή της μεθόδου Monte Carlo για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας σε διάφορες παραμέτρους.

Η ιδιαίτερη σημασία των συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας και ο ρόλος τους στον ενεργειακό σχεδιασμό κτιρίων μπορεί να γίνουν αντιληπτά από τον τρόπο που διαφοροποιούνται τα αποτελέσματα αναλόγως της ύπαρξης ή μη των συστημάτων αυτών στην συγκεκριμένη εφαρμογή.

Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως στην εργασία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις υπάρχουσες τεχνολογίες αποθήκευσης θερμότητας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορων ειδών κτιριακές εφαρμογές. Γίνεται μια μικρή βιβλιογραφική ανασκόπηση προκειμένου να γίνουν αντιληπτές οι τεχνολογικές εξελίξεις στα συστήματα αυτά, αλλά και για να δοθεί μια επεξήγηση του τρόπου λειτουργίας τους, ο οποίος παρουσιάζει επιστημονικό ενδιαφέρον ιδιαίτερα για τον κλάδο των Χημικών Μηχανικών.

Ξεκινώντας, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι διάφορες υπάρχουσες τεχνολογίες αποθήκευσης θερμότητας αφού ταξινομηθούν σε κατηγορίες. Συνεχίζοντας, στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται θεωρητικά οι έννοιες του γραμμικού προγραμματισμού και της βελτιστοποίησης κατά Monte Carlo και δίνεται έμφαση στην πλατφόρμα GAMS και στην μέθοδο SIMPLEX. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται ανάλυση της μελέτης περίπτωσης που είναι το συγκρότημα κατοικιών και επεξηγούνται οι λεπτομέρειες της εφαρμογής. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η κατασκευή του μοντέλου της εφαρμογής. Η κατασκευή του μοντέλου περιλαμβάνει την κατάστρωση των βασικών μαθηματικών εξισώσεων που το περιγράφουν καθώς και την εισαγωγή περιορισμών, παραμέτρων αλλά και δεδομένων. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται αναλυτικά σε διαγράμματα και πίνακες όλα τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με την χρήση του γραμμικού προγραμματισμού αλλά και τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας με την προσομοίωση Monte Carlo. Επίσης γίνονται όλοι οι απαραίτητοι σχολιασμοί των αποτελεσμάτων. Στο Κεφάλαιο 7, υπάρχουν τα βασικά και γενικά συμπεράσματα σχετικά με το μελετώμενο σύστημα τα οποία προκύπτουν από την αξιολόγηση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Στο Κεφάλαιο 8 υπάρχει η λίστα με την ελληνική και ξένη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Τέλος, στο Κεφάλαιο 9 επισυνάπτεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο περιβάλλον GAMS για την βελτιστοποίηση και την ανάλυση ευαισθησίας του συστήματος.

2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΤΙΡΙΩΝ

Η αποθήκευση της θερμότητας αποτελεί μια τεχνολογία η οποία βρίσκει πρόσφορο έδαφος στον ενεργειακό σχεδιασμό διαφόρων ειδών εφαρμογών. Συστήματα αποθήκευσης θερμότητας μπορούν να εφαρμοστούν σε βιομηχανίες, σε κτίρια κατοικιών, σε κτίρια αθλητικών εγκαταστάσεων, εμπορικά κέντρα κλπ. Η εργασία αυτή, όπως έχει ειπωθεί, εξειδικεύεται με εφαρμογή της αποθήκευσης θερμότητας σε ένα μεγάλο συγκρότημα κατοικιών, κάτι το οποίο θα μπορούσε να επιτευχθεί με διάφορες τεχνολογίες οι οποίες περιγράφονται στις επόμενες σελίδες αφού γίνει πρώτα μια γενική εισαγωγή στις αρχές της αποθήκευσης θερμότητας.

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η ενέργεια αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την παγκόσμια οικονομία και την ευημερία του πληθυσμού. Η ολοένα συνεχώς παγκοσμίως αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας οδηγεί σε αύξηση της τιμής της και συνεπώς στην ανάγκη καλύτερης διαχείρισής και εξοικονόμησης της για οικονομικούς, περιβαλλοντικούς αλλά και βιοποριστικούς σκοπούς. Γι' αυτούς τους λόγους τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται όλο και περισσότερο τεχνολογίες που μας επιτρέπουν να κάνουμε αποθήκευση περίσσειας ενέργειας με σκοπό την μελλοντική της χρήση όταν αυτή χρειαστεί. Υπάρχουν πολλοί τρόποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση ενέργειας ανάλογα με την μορφή αποθήκευσής της [6]:

- Μηχανικός
- Χημικός
- Βιολογικός
- Μαγνητικός
- Θερμικός

Ο καθένας από τους τρόπους αποθήκευσης αποτελείται από επιμέρους κατηγορίες στις οποίες αντιστοιχούν πολυάριθμες μέθοδοι αποθήκευσης. Στην διπλωματική εργασία αυτή θα αναλυθεί η αποθήκευση θερμότητας και θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις κατηγορίες στις οποίες χωρίζεται.

Αποθήκευση ενέργειας με την μορφή θερμότητας

Η θερμότητα αποτελεί μια μορφή ενέργειας που συναντάται συχνά στην φύση αλλά και σε πολλές εφαρμογές και διεργασίες και συνεπώς αποτελεί μια βασική επιδίωξη η επίτευξη της αποτελεσματικής αποθήκευσής της. Για να διευκολυνθεί όμως η μελέτη της αποθήκευσης θερμότητας, μπορούμε να την χωρίσουμε σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

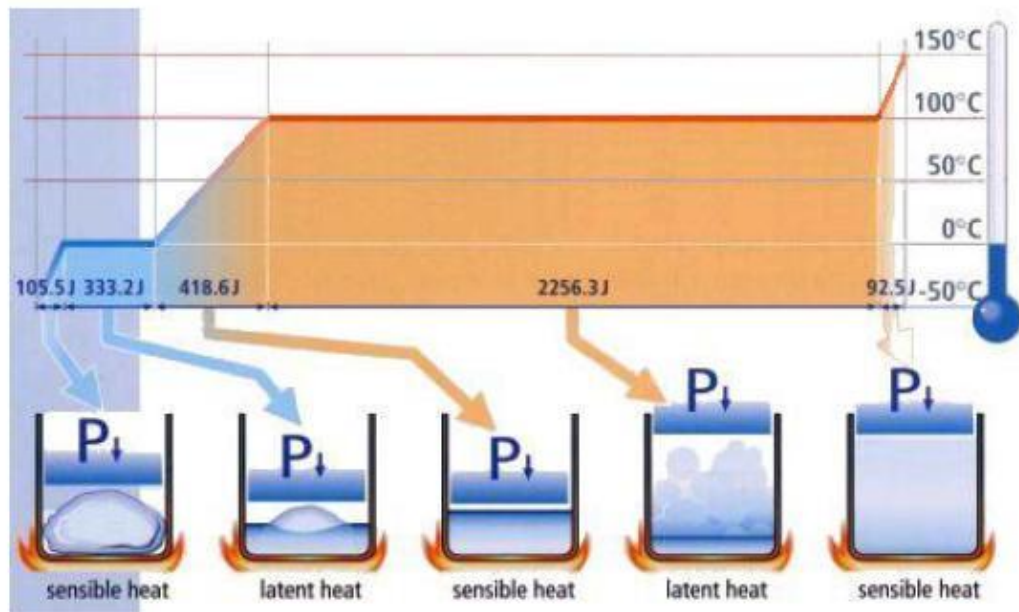
- Αποθήκευση αισθητής θερμότητας (Sensible Thermal Energy Storage)
- Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (Latent Thermal Energy Storage)
- Θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας (Thermochemical Thermal Energy Storage)
- Αποθήκευση θερμότητας μέσω ρόφησης (Sorption Thermal Energy Storage)

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας και η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας είναι οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι αποθήκευσης θερμότητας. Αντιθέτως η θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας και η αποθήκευση θερμότητας μέσω ρόφησης δεν χρησιμοποιούνται συχνά μιας και βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο εφαρμογής.

2.2 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

2.2.1 Γενικά

Όπως είναι γνωστό, αισθητή θερμότητα ονομάζεται η θερμότητα η οποία κατά την διάρκεια της απορρόφησης και της εκρόφησης της από ένα υλικό προκαλεί μεταβολή της θερμοκρασίας του. Αυτό συμβαίνει γιατί το ποσό της θερμότητας αυτής χρησιμοποιείται για την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του υλικού που έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του. Η αισθητή θερμότητα διαφέρει από την λανθάνουσα θερμότητα που είναι η θερμότητα η οποία προσροφάται από ένα υλικό που χρησιμοποιείται για την διάσπαση των χημικών δεσμών του κι έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή φάσης του υλικού υπό σταθερή θερμοκρασία. Στο Σχήμα 2.1 μπορούμε να δούμε τα ποσά αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας που απορροφά τον νερό κατά την διάρκεια της θέρμανσής του από τους -50°C στους 100°C .



Σχήμα 2.1: Ποσά αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας που απορροφά το νερό κατά την θέρμανσή του.

Η βασική εξίσωση που δίνει την ποσότητα αποθηκευμένης αισθητής θερμότητας στο υλικό είναι:

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = V \int_{T_1}^{T_2} \rho c_p dT$$

Όπου:

m = μάζα του υλικού

c_p = ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού

ρ = πυκνότητα του υλικού

V = ο όγκος της αποθήκης

Η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας, προφανώς εξαρτάται από την τιμή του γινομένου ρc_p . Πιο συγκεκριμένα, όσο ψηλότερες είναι οι τιμές των ρ , c_p , τόσο περισσότερη ενέργεια θα αποθηκευτεί σε συγκεκριμένο όγκο υλικού. Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί, ότι η χρήση του νερού ως αποθηκευτικό μέσο μεγιστοποιεί την παραπάνω ποσότητα. Μερικά από τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας είναι στον Πίνακα 2.1:

| Υλικό | Πυκνότητα ρ (kg/m^3) | Ειδική θερμοχωρητικότητα C_p ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$) | Θερμοχωρητικότητα κατά όγκο ($10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K}$) |
|------------|---|--|---|
| Νερό | 988 | 4182 | 4,17 |
| Χαλίκια | 2050 | 712 | 1,57 |
| Μπετόν | 2000 | 880 | 1,76 |
| Τούβλο | 1800 | 837 | 1,51 |
| Ξύλο | 700 | 2390 | 1,67 |
| Γυαλί | 2710 | 837 | 2,27 |
| Αλουμίνιο | 2710 | 896 | 2,43 |
| Ατσάλι | 7840 | 465 | 3,68 |
| Σίδηρος | 7900 | 452 | 3,57 |
| Πηλός | 1458 | 879 | 1,28 |
| Μαγνητίτης | 5177 | 752 | 3,89 |

Πίνακας 2.1: Υλικά για αποθήκευση αισθητής θερμότητας [7].

Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση της αποθήκευσης, όπως η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμική διάχυση, η συμβατότητα του αποθηκευτικού μέσου με την αποθήκη, η σταθερότητα του υλικού στην ψηλότερη θερμοκρασία του κύκλου κ.ά.

Οι διάφοροι τρόποι αποθήκευσης αισθητής θερμότητας μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- **ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ**
- **ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ**

2.2.2 Αποθήκευση σε δεξαμενές

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας σε δεξαμενές περιλαμβάνει δύο είδους κατηγορίες: τις θερμικές κλίνες στερεών και τις δεξαμενές υγρών.

2.2.2.1 Δεξαμενές υγρών (water tanks)

Γενικά η αποθήκευση σε δεξαμενές υγρών είναι μια συνήθης τεχνολογία αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, στις δεξαμενές υγρών, προτιμάται το νερό ως αποθηκευτικό μέσο για τους παρακάτω λόγους [8]:

- Μεγάλη τιμή ρC_p σε σχέση με τα άλλα υγρά, κάτι που μας επιτρέπει μεγαλύτερη αποθήκευση θερμότητας με τον μικρότερο δυνατό όγκο
- Σχεδόν μηδενικό κόστος αγοράς

- Ευρύ θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας (10 – 90 °C) το οποίο μπορεί να διευρυνθεί περισσότερο με ειδικά πρόσθετα
- Το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποθηκευτικό μέσο αλλά και ως ρευστό που μεταφέρει την θερμότητα. Έτσι το σύστημα γίνεται πιο απλό και φτηνό διότι δεν προϋποθέτει την ύπαρξη εναλλακτών θερμότητας.

Η διαδικασία αποθήκευσης είναι σχετικά απλή, η θερμότητα οδηγείται μέσω του νερού στις δεξαμενές αυτές όπου και το θερμό νερό αποθηκεύεται για κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να υπάρξει η ανάγκη για ζήτησή του. Για να γίνει αυτό όμως οι δεξαμενές πρέπει να είναι θερμικά μονωμένες όταν βρίσκονται σε ανοικτό περιβάλλον και μερικώς μονωμένες (μικρό πάχος μόνωσης) όταν βρίσκονται μέσα στο έδαφος (το έδαφος δρα ως φυσικός μονωτής).

Τα αρνητικά αυτών των δεξαμενών αποθήκευσης είναι το κόστος της μόνωσης το οποίο αυξάνεται όταν υπάρχει ανάγκη αποταμίευσης θερμότητας για μεγάλα χρονικά διαστήματα (διεποχιακή αποθήκευση) μιας και είναι ο μόνος τρόπος να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες (τα μονωτικά υλικά έχουν απώλειες θερμότητας). Επίσης για την ικανοποίηση πολύ μεγάλων θερμικών φορτίων το κόστος κατασκευής και τοποθέτησης μιας τέτοιας δεξαμενής αυξάνεται κατακόρυφα.

Οι δεξαμενές συνήθως κατασκευάζονται από μπετόν ή χάλυβα και τα μονωτικά υλικά είναι ο υαλοβάμβακας, ο πετροβάμβακας και ινώδη υλικά με καλή αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες όπως πολυαιθυλένιο, πολυουρεθάνη, αφρώδες γυαλί κ.ά.

2.2.2.2 Θερμική κλίνη στερεών (rock bed)

Η θερμική κλίνη στερεών είναι μια δεξαμενή η οποία περιέχει θερμοαπορροφητικά στερεά διαμέσου των οποίων διέρχεται ένα ρευστό, συνήθως αέρας ο οποίος μεταφέρει την θερμότητα προς τα στερεά αυτά. Τα στερεά αυτά συγκρατούν την θερμότητα και μπορούν να την αποδώσουν πίσω ξανά στο ρευστό όταν αυτό χρειαστεί. Βασικό χαρακτηριστικό των κλινών αυτών είναι το γεγονός ότι ως θερμικοί εναλλάκτες παρουσιάζουν μεγάλο λόγο επιφάνειας εναλλαγής προς τον όγκο τους. Μία ποικιλία από στερεά μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως χαλίκια, σίδερο, τσιμέντο, τούβλα, κεραμικά κλπ. [9]

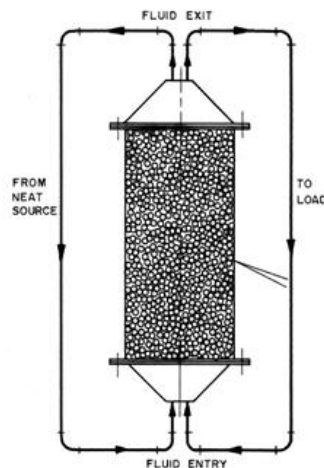
Τα πλεονεκτήματα στη χρήση μιας τέτοιας θερμικής αποθήκης είναι:

- Ο μεγάλος συντελεστής της θερμικής μεταφοράς μεταξύ του αέρα και του στερεού υλικού της αποθήκης, που έχει ως αποτέλεσμα την θερμική στρωμάτωση.

- Η μικρή αγωγιμότητα της αποθήκης όταν δεν υπάρχει ροή αέρα.
- Το μικρό κόστος του υλικού αποθήκευσης αλλά και της δεξαμενής.

Ωστόσο, η μέθοδος αυτή αποθήκευσης παρουσιάζει και μειονεκτήματα, τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- Η μεγάλη πτώση πίεσης που παρουσιάζεται κατά την διάρκεια της διέλευσης του αέρα από την θερμική κλίση, γεγονός το οποίο απαιτεί την ύπαρξη μεγάλης ισχύος ανεμιστήρων.
- Ο όγκος της κλίσης είναι πολύ μεγαλύτερος από τον όγκο της ισοδύναμης δεξαμενής νερού αφού η ειδική θερμοχωρητικότητα των διάφορων στερεών είναι μικρότερη από αυτή του νερού.
- Υπάρχουν κάποια λειτουργικά προβλήματα όπως η δυσκολία καθαρισμού του στερεού υλικού της αποθήκης από την σκόνη και η παρουσία υγρασίας.



Σχήμα 2.2: Θερμική κλίση στερεών [10].

2.2.3 Αποθήκευση στο έδαφος

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας στο έδαφος χρησιμοποιείται συνήθως όταν έχουμε μεγάλα ποσά θερμικών φορτίων τα οποία θέλουμε να αποταμιεύσουμε μακροπρόθεσμα. Το έδαφος θεωρείται ένα καλό αποθηκευτικό και μονωτικό μέσο και η αποθήκευση στο έδαφος είναι ένα σύστημα δεν απαιτεί την επίγεια κατανάλωση χώρου για να λειτουργήσει. Η αποθήκευση στο έδαφος μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες [8]:

- Στην αποθήκευση θερμότητας σε υδροφόρα στρώματα (ATES)
- Στην αποθήκευση θερμότητας σε γεωτρήσεις (BTES)
- Στην αποθήκευση θερμότητας σε σπηλιές (CTES)

2.2.3.1 Αποθήκευση θερμότητας σε υδροφόρα στρώματα (ATES)

Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αποθήκευσης, η οποία χρησιμοποιεί το υπέδαφος, είναι η υπόγεια θερμική ενεργειακή αποθήκευση υδροφόρων στρωμάτων, τα οποία είναι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν νερό. Τα στρώματα αυτά είναι άφθονα και το βάθος τους ποικίλει. Το νερό μεταφέρεται με σωλήνες στο υδροφόρο στρώμα το οποίο δρα με αποτελεσματικότητα ως αποθηκευτικό μέσο. Στο σύστημα αυτό υπάρχουν δύο φρεάτια, ένα υψηλής θερμοκρασίας και ένα χαμηλής θερμοκρασίας όπου γίνεται αποθήκευση θερμότητας υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας αντίστοιχα. Η τεχνολογία αυτή συγκεντρώνει όλο και περισσότερο ενδιαφέρον, λόγω της οικονομίας που επιτυγχάνεται στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας η οποία φτάνει σε πολλές περιπτώσεις το 75% και λόγω του μικρού χρόνου απόσβεσης για τις πρόσθετες επενδύσεις που είναι συντομότερος από πέντε έτη.



Σχήμα 2.3: Παράδειγμα αποθήκευσης θερμότητας σε υδροφόρα στρώματα σε αεροδρόμιο.

2.2.3.2 Αποθήκευση θερμότητας σε γεωτρήσεις (BTES)

Σε αυτή την τεχνολογία αποθήκευσης χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας σε κάθετες γεωτρήσεις που διασφαλίζουν τη μεταφορά θερμότητας από και προς το έδαφος. Πιο συγκεκριμένα μέσω αυτών των εναλλακτών θερμότητας, μεταφέρεται θερμότητα προς το έδαφος κατά την περίοδο της θερμικής φόρτισης του εδάφους και αντίστροφα θερμικά φορτία από το έδαφος προς την κατανάλωση κατά την περίοδο της θερμικής φόρτισής του. Στο σύστημα αυτό το σύστημα μπορούν να επιτευχθούν αποδοτικότητες αποθήκευσης μέχρι και 70%. Μερικές σημαντικές παράμετροι για ένα επιτυχές πρόγραμμα αποθήκευσης σε γεωτρήσεις είναι η υψηλή ειδική θερμότητα και η μέση-υψηλή θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων.

2.2.3.3 Αποθήκευση θερμότητας σε σπηλιές (CTES)

Με την αποθήκευση σε σπήλαια και σε κοιλάτες. Δημιουργούνται στο έδαφος υπόγεια υδραγωγεία και χρησιμεύουν ως θερμικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης. Ενέργεια αποθηκεύεται και απομακρύνεται από αυτούς τους σχηματισμούς με κυκλοφορία προς και από αυτούς. Είναι μια μέθοδος που σπάνια χρησιμοποιείται.

2.3. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

2.3.1 Εισαγωγή

Η αποθήκευση αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας είναι οι δύο κύριες τεχνικές αποθήκευσης θερμότητας, οι οποίες χρησιμοποιούνται σήμερα σε διάφορες εφαρμογές, όπως θέρμανση χώρων και νερού χρήσης. Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας κυρίως σε νερό και αδρανή στερεά, βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο εξέλιξης, σε αντίθεση με την αποθήκευση θερμότητας μέσω αλλαγής φάσης, η οποία είναι ακόμη μια αναπτυσσόμενη αλλά πολλά υποσχόμενη τεχνολογία.

Η ιδέα της αποθήκευσης της λανθάνουσας θερμότητας, δηλαδή η αποθήκευση και η ανάκτηση θερμότητας μέσω αλλαγής φάσης, χαρακτηρίζεται από τη σχετικά μεγάλη ποσότητα της λανθάνουσας θερμότητας λόγω της ισοθερμοκρασιακής αλλαγής κατάστασης του χρησιμοποιούμενου μέσου (PCM). Γενικά, οδηγεί σε υψηλή πυκνότητα ενεργειακής αποθήκευσης σε σύγκριση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας με τη χρήση νερού ή αδρανών στερεών, με αποτέλεσμα μικρότερες συσκευές αποθήκευσης και μειωμένες απώλειες.

Ωστόσο προβλήματα που αφορούν στα δοχεία αποταμίευσης, το κόστος των PCMs, αλλά και η ατελής επαναστερεοποίηση ορισμένων αλάτων, έχουν συντελέσει στην περιορισμένη χρήση της αποταμίευσης θερμότητας μέσω αλλαγής φάσης, με αποτέλεσμα πολλές φορές να είναι προτιμότερη η αποταμίευση αισθητής θερμότητας [8].

2.3.2 Λανθάνουσα θερμότητα

2.3.2.1 Γενικά

Όπως είναι γνωστό, απαιτείται ενέργεια για την αλλαγή φάσης ενός μέσου, η οποία λέγεται λανθάνουσα θερμότητα. Η ενέργεια αυτή σπάει τους δεσμούς μεταξύ των ατόμων ή των μορίων στη κρυσταλλική δομή του μέσου, ενώ η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, κάτι το οποίο είναι γενικά επιθυμητό για την αποδοτική λειτουργία των περισσότερων θερμικών συστημάτων.

2.3.2.2 Αποθήκευση θερμότητας

Θερμότητα αποθηκεύουμε όχι μόνο υπό μορφή αισθητής θερμότητας αλλά και λανθάνουσας θερμότητας. Η αποταμίευση θερμότητας μέσω αλλαγής φάσης είναι μια ιδιαίτερος ελκυστική τεχνική ενεργειακής αποθήκευσης, η οποία βασίζεται στην απορρόφηση ή έκλυση θερμότητας, όταν το μέσο υφίσταται αλλαγή φάσης. Η θερμότητα λοιπόν, που μπορεί να αποθηκευτεί, όταν θερμανθεί μια ουσία που αλλάζει φάση από μια θερμοκρασία T_1 σε μια θερμοκρασία T_2 , όταν ισχύει $T_1 < T_m < T_2$, όπου T_m η θερμοκρασία αλλαγής φάσης της ουσίας είναι:

$$Q = m \cdot [(T_m - T_i)] \cdot C_s + k + (T_2 - T_m) \cdot C_f$$

όπου:

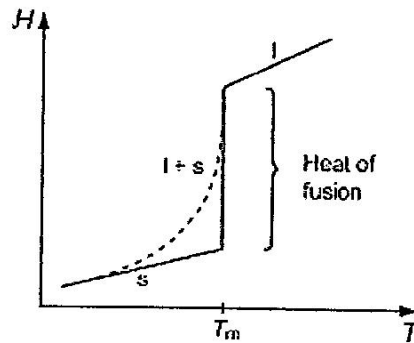
- m η μάζα της ουσίας
- k η λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης
- C_s η ειδική θερμοχωρητικότητα της στην πρώτη φάση
- C_f η ειδική θερμοχωρητικότητα της στη δεύτερη φάση

Η απόδοση της εξαρτάται από την λανθάνουσα θερμότητα τήξης και πήξης του υλικού αποθήκευσης. Σε αντιστάση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, η θερμοκρασία του μέσου παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης, με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των απωλειών κατά τη φάση αυτή και τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των συλλεκτών.

Δύο τρόποι έχουν προταθεί για να βελτιωθεί η απόδοση της αποθήκευσης θερμότητας αλλαγής φάσης. Ο πρώτος αφορά στην αύξηση της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης του μέσου αποταμίευσης και ο δεύτερος στη χρήση αντλίας θερμότητας, η οποία θα αυξήσει τη θερμοκρασία της εξαγόμενης από το σύστημα θερμότητας, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ενεργειακές ανάγκες.

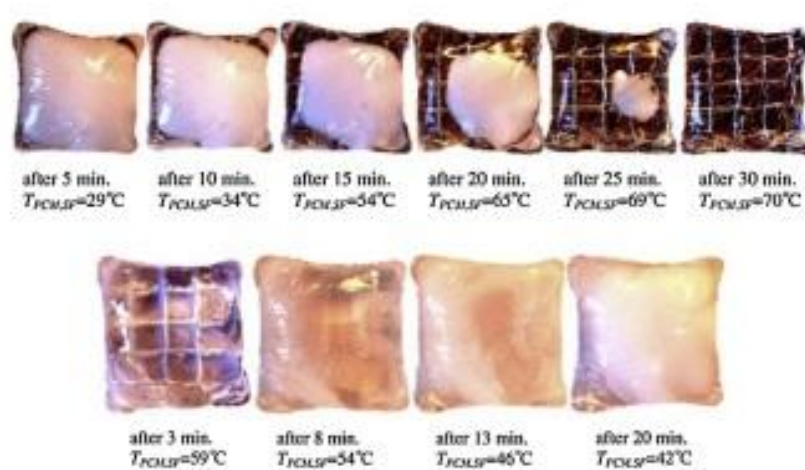
Σε ότι αφορά την ενθαλπία, δηλαδή την αποθηκευόμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας, κατά τη διάρκεια της φόρτισης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4, η θερμοκρασία ενός στερεού PCM αυξάνεται με την πρόσδοση ενέργειας, η οποία αποθηκεύεται ως αισθητή θερμότητα όσο το υλικό είναι σε στερεά κατάσταση. Κατά τη διάρκεια της ισοθεμοκρασιακής αλλαγής φάσης από την στερεά (s) στην υγρή κατάσταση (l), απορροφάται λανθάνουσα θερμότητα και όταν η διαδικασία έχει τελειώσει, η επιπλέον ενέργεια οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση θερμοκρασίας (αισθητή θερμότητα στην υγρή φάση).



Σχήμα 2.4: Αποθηκευόμενη ενθαλπία συναρτήσει της θερμοκρασίας για υλικό αλλαγής φάσης [11].

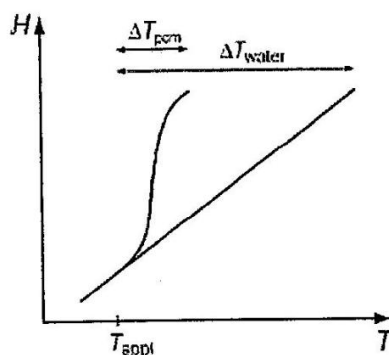
Η κλίση των γραμμών s και l δίνουν τη θερμοχωρητικότητα στη στερεή και υγρή φάση αντίστοιχα. Για υλικά ασύγχρονης τήξης, η θερμοκρασία κατά την αλλαγή φάσης δεν είναι σαφώς καθορισμένη αλλά παρουσιάζεται σε ένα εύρος θερμοκρασιών, το οποίο αποδίδεται από τη διακεκομμένη καμπύλη γραμμή του σχήματος 2.4.



Σχήμα 2.5: Στάδια τήξης PCM (πάνω) καθώς και πήξης του (κάτω) κατά τα οποία απορροφάται και απελευθερώνεται θερμότητα [12].

2.3.2.3 Χωρητικότητα αποθήκευσης

Η αποταμίευση θερμότητας μέσω αλλαγής φάσης, έχει πολύ υψηλότερη σύμφυτη χωρητικότητα, γιατί η αλλαγή της καταστάσεως του υλικού απαιτεί πολύ περισσότερη ενέργεια από αυτήν που απαιτεί μόνο η αύξηση της αισθητής του θερμότητας. Σαν λανθάνουσα ενέργεια μπορεί υπό τον ίδιο όγκο να αποταμιευθεί 60% περισσότερη θερμότητα, από ότι σαν αισθητή ή διαφορετικά η λανθάνουσα ενέργεια μπορεί να αποταμιευθεί σε όγκο 60% μικρότερο από τον αντίστοιχο της αισθητής θερμότητας. Πέρα όμως από τη μείωση του μεγέθους του συστήματος, με τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης, επιτυγχάνεται και μείωση του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας του συστήματος, αφού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6 το ίδιο ποσό θερμότητας ενέργειας μπορεί να αποθηκευθεί με στενότερο εύρος θερμοκρασιών στην περίπτωση χρήσης PCM από ότι με χρήση νερού.



Σχήμα 2.6: Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας με χρήση νερού και PCM [10].

2.3.3 Υλικά αλλαγής φάσης (PCM)

2.3.3.1 Γενικά

Όπως έχει προαναφερθεί, τα υλικά είναι μια από τις βασικότερες συνιστώσες της αποθήκευσης θερμότητας. Εν προκειμένω, τα υλικά αλλαγής φάσης είναι υλικά μέσω των οποίων γίνεται αποθήκευση ενέργειας με αλλαγή φάσης. Όσο η θερμοκρασία του μέσου ανεβαίνει, οι χημικοί δεσμοί σπάνε μέσα στα PCMs, ενώ η κατάσταση του υλικού αλλάζει. Γενικά, αλλαγή φάσης μπορεί να γίνει από στερεό σε υγρό, από στερεό σε αέριο, από υγρό σε αέριο, ακόμα κι από στερεό σε στερεό (αλλαγή κρυσταλλικών δομών). Ωστόσο, κατά κύριο λόγο στις περισσότερες εφαρμογές, για πρακτικούς λόγους, χρησιμοποιούνται μόνο PCMs που αλλάζουν φάση από στερεό σε υγρό.

Γενικά υπάρχουν πολλά PCMs (στερεό-υγρό) που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, μερικά από τα οποία είναι πινακοποιημένα στον Πίνακα 2.2 ανάλογα με το θερμοκρασιακό τους εύρος.

| Θερμοκρασιακό εύρος (°C) | Υλικό | Θερμοκρασία αλλαγής φάσης(°C) | Λανθάνουσα θερμότητα (kJ/kg) |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 0 - 100 | Νερό | 0 | 345 |
| | Παραφίνη | 20 - 60 | 140 - 280 |
| | Ένυδρο άλας | 30 - 50 | 170 - 270 |
| 100 - 400 | AlCl ₃ | 192 | 280 |
| | LiNO ₃ | 250 | 370 |
| | Na ₂ O ₃ | 360 | 314 |
| 400 – 800 | KClO ₄ | 699 | 2678 |
| | LiH | 868 | 932 |
| 800 – 1500 | LiF | 993 | 750 |
| | MgF ₂ | 1271 | 966 |
| | Si | 1415 | 1654 |

Πίνακας 2.2: Διάφορα υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας [13].

2.3.3.2 Ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης

Πολλές είναι οι δυσκολίες για να κατασκευασθεί και να λειτουργήσει οικονομικά και αξιόπιστα μια θερμική αποθήκη αλλαγής φάσης. Οι δυσκολίες αυτές καθορίζουν και τις επιθυμητές ιδιότητες ενός υλικού, για να θεωρηθεί κατάλληλο θερμικό αποθηκευτικό μέσο.

Ειδικά για τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν καθοριστεί τα παρακάτω κριτήρια [14]:

A) Θερμικά χαρακτηριστικά

- 1) Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης
- 2) Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης
- 3) Υψηλή θερμική αγωγιμότητα

Το PCM που θα επιλέξουμε θα πρέπει να έχει το κατάλληλο εύρος θερμοκρασιών συμβατό με την εφαρμογή μας. Επιπλέον η λανθάνουσα θερμότητα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ανά μονάδα όγκου προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο φυσικός όγκος της εφαρμογής μας. Τέλος η καλή θερμική αγωγιμότητα βοηθάει στην θερμική φόρτιση και αποφόρτιση του PCM.

B) Φυσικά χαρακτηριστικά

- 1) Κατάλληλη ισορροπία φάσης

- 2) Υψηλή πυκνότητα
- 3) Μικρή αλλαγή όγκου
- 4) Χαμηλή τάση ατμών

Σταθερότητα του PCM κατά την διάρκεια της υγροποίησης και στερεοποίησης είναι επιθυμητή για την ομαλή λειτουργία της εφαρμογής μας. Επίσης υψηλή πυκνότητα μικρή αλλαγή όγκου και χαμηλή πίεση ατμών μειώνουν τα προβλήματα όγκου και αντοχής συσκευασμού των PCM

Γ) Κινητικές ιδιότητες

- 1) Απουσία υπέρψυξης
- 2) Επαρκής ρυθμός κρυσταλλοποίησης

Ένα σοβαρό πρόβλημα που αφορά στο σύνολο των ανόργανων PCM αλλά και σε μέρος των οργανικών είναι το φαινόμενο της υπέρψυξης. Το φαινόμενο της υπέρψυξης είναι η διαδικασία της μείωσης της θερμοκρασίας ενός υγρού ή ενός αερίου κάτω από το σημείο ψύξης του χωρίς αυτό να γίνει ένα στερεό. Το φαινόμενο της υπέρψυξης μπορεί να δημιουργηθεί ως αποτέλεσμα του φαινομένου της αποσύνθεσης του ένυδρου άλατος σε συνδυασμό με τα μειωμένα επίπεδα πυρηνοποίησης κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης του υλικού.

Δ) Χημικές Ιδιότητες

- 1) Μεγάλης διάρκειας χημική σταθερότητα
- 2) Συμβατότητα με τα υλικά κατασκευής
- 3) Μη τοξικά
- 4) Μη εύφλεκτα

Τα PCM υποβαθμίζονται, από την απώλεια νερού της ένυδρης ουσίας, από την χημική αποσύνθεση και την μη συμβατή λειτουργία με τα υλικά κατασκευής. Επιπλέον για λόγους ασφαλείας τα PCM θα πρέπει να είναι μη τοξικά και μη εύφλεκτα.

Ε) Οικονομικά κριτήρια

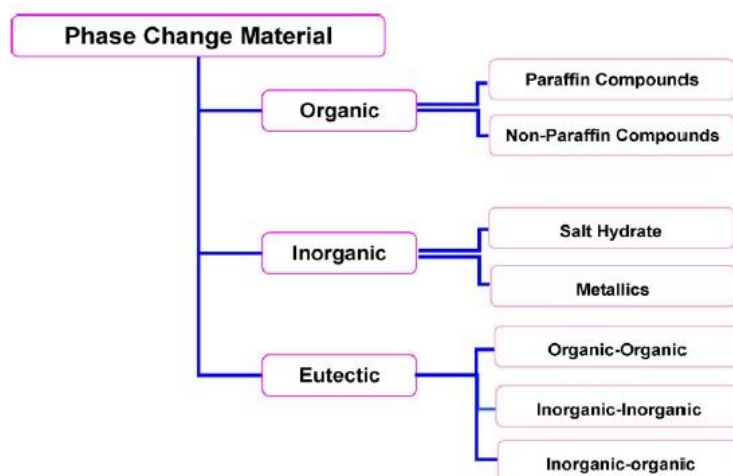
- 1) Αφθονία υλικού
- 2) Διαθεσιμότητα υλικού
- 3) Καλή σχέση τιμής απόδοσης

Χαμηλό κόστος και μεγάλης κλίμακας διαθεσιμότητα είναι πολύ για την αξιοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης.

2.3.4 Κατηγοριοποίηση υλικών αλλαγής φάσης

2.3.4.1 Γενικά

Το πλέον γνωστό υλικό αλλαγής φάσης είναι το νερό που κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο μπορεί να αποθηκεύσει πολύ μεγάλα ποσά θερμότητας. Όμως μερικές από τις ιδιότητες του, όπως η θερμοκρασία πήξης του στους 0°C, η μεγάλη μεταβολή της πυκνότητας του με τη θερμοκρασία κ.λπ., δημιουργούν σημαντικά προβλήματα κατά τη χρήση του ως PCM. Έτσι, η ιδέα ήταν να αναπτυχθούν υλικά με βάση το νερό, ώστε να παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα του (μεγάλη αγωγιμότητα, μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας) αλλά όχι τα υπόλοιπα προβλήματα της χρήσης του και ιδιαίτερα τη θερμοκρασία τήξης. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν τα πρώτα PCM που είναι τα ένυδρα άλατα, μια κατηγορία υλικών που αναπτύσσεται και τελειοποιείται ακόμη και σήμερα. Ανάλογα με τις τεχνικές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται τα PCM, πολλές διαφορετικές κατηγορίες υλικών έχουν μελετηθεί στο παρελθόν. Η ομαδοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να γίνει με βάση πολλούς διαφορετικούς παράγοντες. Πρώτος και σημαντικότερος είναι η σύσταση, σύμφωνα με την οποία χωρίζονται σε οργανικά και ανόργανα υλικά. Άλλοι παράγοντες είναι οι εφαρμογές που καλύπτουν καθώς επίσης και το εύρος θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης τους. Η κατηγοριοποίηση ως προς τη σύσταση, επειδή είναι η συνηθέστερη και πιο σημαντική, αναλύεται περισσότερο παρακάτω. Στο ακόλουθο σχήμα 2.7 διακρίνονται οι επιμέρους ομάδες υλικών που δημιουργούνται από το διαχωρισμό αυτού του είδους [14]



Σχήμα 2.7: Κατηγοριοποίηση PCM [14].

Ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται, τα υλικά αλλαγής φάσης επιλέγονται αρχικά βάσει της θερμοκρασίας τήξης τους. Υλικά που τήκονται σε θερμοκρασία χαμηλότερη των 15°C, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές κλιματισμού, ενώ υλικά των οποίων η θερμοκρασία τήξης κυμαίνεται από 15°C έως 90°C χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλιακής θέρμανσης. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός υλικών αλλαγής φάσης, οργανικά, ανόργανα και ευτηκτικά, ανάλογα με την θερμοκρασία τήξης και τη λανθάνουσα θερμότητα τους.

2.3.4.2 Οργανικά PCM

Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν σταθερούς κύκλους θερμικής φόρτισης και αποφόρτισης χωρίς προβλήματα διαχωρισμού των φάσεων, δεν εμφανίζουν το φαινόμενο της υπέρψυξης και είναι συνήθως μη διαβρωτικά. Τα οργανικά υλικά ταξινομούνται ως παραφινούχα και μη παραφινούχα.

2.3.4.2.1 Παραφίνες

Οι παραφίνες είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες με γενικό τύπο C_nH_{2n+2} και είναι κύρια συστατικά του φυσικού αερίου και πετρελαίου. Στις παραφίνες, το σημείο υγροποίησης και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης αυξάνουν καθώς μεγαλώνει το μήκος της αλυσίδας. Οι παραφίνες που έχουν κάτω από 5 άτομα άνθρακα είναι σε αέρια μορφή, οι παραφίνες με 5 έως 15 άτομα άνθρακα είναι υγρές ενώ οι υπόλοιπες είναι σε στερεά κατάσταση[8]. Ανάλογα με τον βαθμό διύλισης τα παραφινούχα προϊόντα χωρίζονται σε τεχνικού, ημι-διυλισμένου και διυλισμένου βαθμού. Όμως για οικονομικούς λόγους, βιώσιμες είναι μόνο οι τεχνικές παραφίνες. Γενικά, οι παραφίνες είναι ασφαλείς, αξιόπιστες, προβλέψιμες, οικονομικές και μη διαβρωτικές. Παρουσιάζουν σταθερότητα για θερμοκρασίες χαμηλότερες από 500 °C, είναι χημικά αδρανείς και έχουν χαμηλή τάση ατμών. Χάρη σε αυτές τις ιδιότητες τα συστήματα που χρησιμοποιούν παραφίνες έχουν μεγάλους κύκλους ψύξης και τήξης. Εκτός από τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν όπως σταθερό σημείο τήξης, έχουν και ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά όπως:

- Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
- Είναι μη συμβατά με πλαστικές συσκευασίες
- Είναι σχετικά εύφλεκτα υλικά

Παρόλα αυτά οι ανεπιθύμητες αυτές ιδιότητες μπορούν να εξαλείφουν με μικρές τροποποιήσεις στο κερί ή στην συσκευασία. Το σημείο τήξης των αλκανίων αυξάνει καθώς μεγαλώνει ο αριθμός των ατόμων του άνθρακα.

2.3.4.2.2 Μη παραφίνες

Οι μη παραφίνες αποτελούν την πλειονότητα των εφαρμογών των PCM με μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών σε αντίθεση με τις παραφίνες που έχουν ομοιότητες στα χαρακτηριστικά τους. Κάποια από αυτά τα υλικά ανήκουν στην υποκατηγορία λιπαρά οξέα. Τα λιπαρά οξέα έχουν υψηλά σημεία τήξης σε σχέση με τα άλλα παραφινούχα υλικά και δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο της υπέρψυξης. Η γενική φόρμουλα των λιπαρών οξέων είναι: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{-COOH}$ και γενικά είναι κατάλληλα για PCM. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι κοστίζουν 2- 2,5 φορές παραπάνω από τις παραφίνες τεχνητού βαθμού και είναι σχετικά διαβρωτικά. Κάποια χαρακτηριστικά γνωρίσματα των οργανικών αυτών υλικών είναι τα εξής:

- Υψηλή θερμοκρασία τήξης
- Εύφλεκτα
- Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
- Χαμηλά σημεία ανάφλεξης
- Ποικίλα επίπεδα τοξικότητας
- Αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες

2.3.4.3 Ανόργανα PCM

Τα ανόργανα υλικά χωρίζονται επιπλέον σε ένυδρα άλατα και στα μεταλλικά. Αυτά τα PCM δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο της υπέρψυξης και αλλάζουν θερμοκρασία τήξης με την πάροδο των κύκλων.

2.3.4.3.1 Ένυδρα άλατα

Τα ένυδρα άλατα είναι στην ουσία κράματα ανόργανων αλάτων και νερού, με χημικό τύπο $\text{AB} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Η αλλαγή φάσης στερεού-υγρού διέπεται από την αφυδάτωση του άλατος, διεργασία η οποία είναι όμοια θερμοδυναμικά με αυτήν της τήξης. Το ένυδρο άλας τήκεται είτε σε ένυδρο άλας με λιγότερα μόρια νερού είτε σε άνυδρο άλας, όπως άλλωστε φαίνεται και από τους ακόλουθους τύπους :



Ένα βασικό πρόβλημα των ένυδρων αλάτων είναι το γεγονός πως η διαδικασία της τήξης δεν διέπεται από ισορροπία και σταθερότητα. Το νερό που αποβάλλεται δεν είναι ικανό να διαλύσει όλο το στερεό, με αποτέλεσμα, εξαιτίας της διαφοράς πυκνότητας, ποσοστό του ένυδρου άλατος με τα λιγότερα μόρια νερού ή του άνυδρου να επικάθεται στο δοχείο και να μην είναι διαθέσιμο κατά την αντίστροφη διαδικασία για επανασύνδεση με το νερό. Αποτέλεσμα αυτού αποτελεί η υποβάθμιση του υλικού με κάθε κύκλο τήξης- πήξης.

Τα ένυδρα άλατα είναι από τις πιο σημαντικές ομάδες των PCM και έχουν μελετηθεί εκτενώς για εφαρμογές λανθάνουσας αποθήκευσης της θερμότητας. Τα πιο ελκυστικά χαρακτηριστικά των ένυδρων αλάτων είναι τα εξής:

- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου
- Σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια σε σχέση με τις παραφίνες)
- Μικρή αλλαγή όγκου στο στάδιο της τήξης, δεν είναι διαβρωτικά, και είναι συμβατά με πλαστική συσκευασία.

Όμως τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν έντονα το φαινόμενο της υπέρψυξης, εξαιτίας του γεγονότος ότι στη θερμοκρασία της τήξης ο ρυθμός πυρηνοποίησης είναι πολύ χαμηλός. Τέλος, ακριβώς επειδή η διαδικασία της τήξης δεν διέπεται από ισορροπία, δεν είναι εφικτό ούτε η αντίστροφη διαδικασία να παρουσιάζει σταθερότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ποσοστό του ένυδρου άλατος με τα λιγότερα μόρια νερού ή του άνυδρου που επικάθεται στο δοχείο τείνει να κρυσταλλοποιηθεί γρηγορότερα.

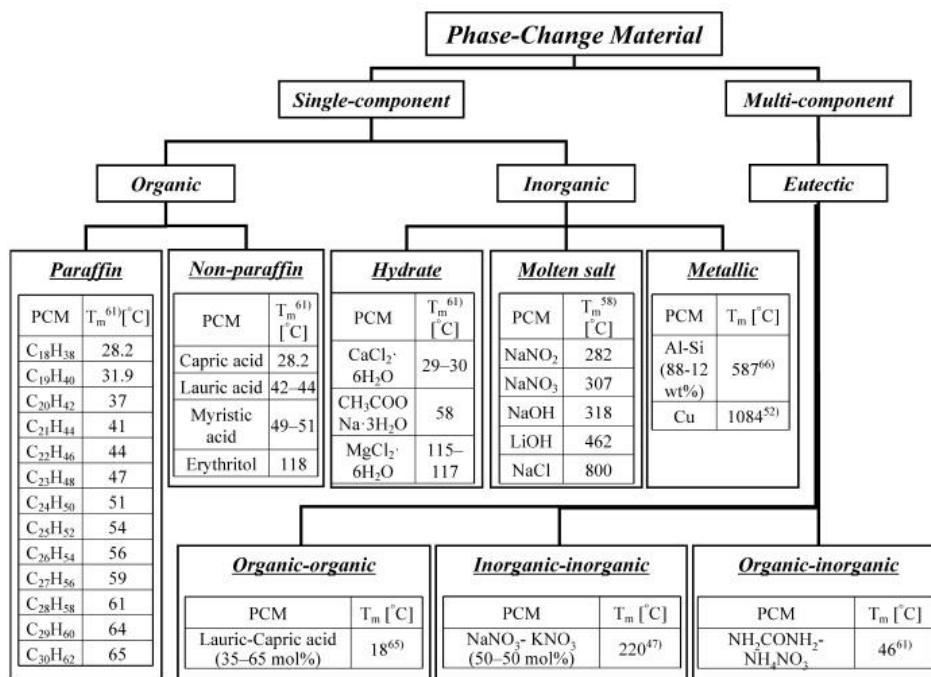
2.3.4.3.2 Μεταλλικά

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα μέταλλα χαμηλού σημείου τήξης και τα εύτηκτα μέταλλα. Τα υλικά αυτά δεν έχουν πολλές εφαρμογές ως PCM λόγω του μεγάλου βάρους τους. Τα βασικά χαρακτηριστικά για τα μεταλλικά είναι:

- Χαμηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα βάρους
- Υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- Χαμηλή ειδική θερμότητα
- Σχετικά χαμηλή πίεση των ατμών

2.3.4.4 Εύτηκτα PCM

Πρόκειται για υλικά ελάχιστης-τήξης, αποτελούμενα από δύο ή περισσότερες ουσίες, καθεμία από τις οποίες τήκεται και πήζει με πλήρη ισορροπία και σταθερότητα, σχηματίζοντας π.χ. κατά την στερεοποίηση το κρυσταλλικό μείγμα. Τα εύτηκτα ολοκληρώνουν τον κύκλο χωρίς να υποστούν υποβάθμιση, καθώς το κρυσταλλικό μείγμα, όπως και το τηκόμενο είναι ομοιογενή, μη αφήνοντας περιθώρια στα συστατικά να διαχωριστούν.

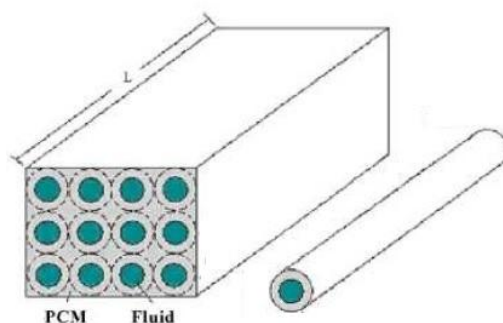


Σχήμα 2.8: Κυριότερα PCM κάθε κατηγορίας (High Performance) Τα Molten Salt και Hydrate αντιστοιχούν στην κατηγορία Ένυδρα άλατα (Salt Hydrates) [15].

2.3.5 Θερμική αποθήκη με υλικά αλλαγής φάσης

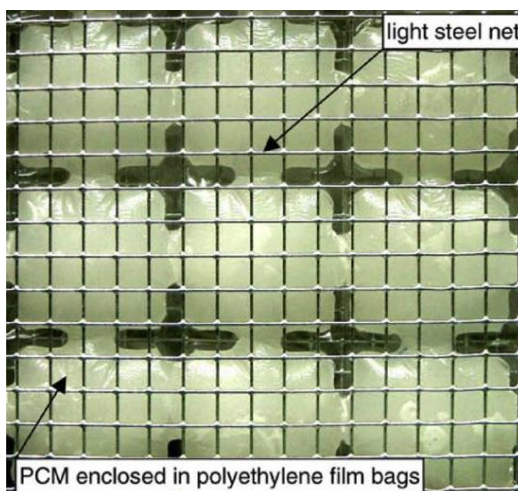
Πέρα από την έρευνα για την ανάπτυξη και χρήση των κατάλληλων υλικών αλλαγής φάσης, καταβάλλεται και μια προσπάθεια για την επιλογή κατάλληλων αποθηκών αλλαγής φάσης. Ως αποθήκη αλλαγής φάσης εννοούμε την αποθήκη η οποία περιέχει τα PCM τα οποία συγκρατούν την θερμότητα. Συνήθως σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών χρησιμοποιούνται δύο ειδών αποθήκες:

Στο πρώτο είδος το PCM τοποθετείται ομοιογενώς σε μια δεξαμενή η οποία διασχίζεται από κυλινδρικούς σωλήνες οι οποίοι φέρουν ένα ρευστό (συνήθως νερό λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας) το οποίο περιέχει την θερμότητα προς αποθήκευση (Σχήμα 2.9). Οι σωλήνες οι οποίοι μπορεί να είναι κατασκευασμένοι από διάφορα υλικά βρίσκονται σε άμεση επαφή με το PCM (σε ορισμένες περιπτώσεις οι ίδιοι οι σωλήνες είναι κατασκευασμένοι από PCM). Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η μεταφορά θερμότητας από το ρευστό υψηλής θερμοκρασίας προς τα PCM και έχουμε ως αποτέλεσμα την αποθήκευσή της. Για την ανάκτηση της αποθηκευμένης θερμότητας γίνεται ακριβώς η ίδια διαδικασία μόνο που σε αυτήν την περίπτωση η μεταφορά της θερμότητας γίνεται από τα PCM προς το ρευστό το οποίο βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία.



Σχήμα 2.9: Αποθηκευτική δεξαμενή η οποία διασχίζεται με κυλινδρικούς σωλήνες κατασκευασμένους από PCM [15].

Στο δεύτερο είδος το PCM τοποθετείται σε κάψουλες (Σχήμα 2.10) . Οι κάψουλες αυτές συνήθως είναι είτε πλαστικές είτε μεταλλικές και το μέγεθός τους ποικίλει. Οι κάψουλες τοποθετούνται μέσα στην δεξαμενή με τέτοιο τρόπο ώστε το ρευστό που φέρει την θερμότητα να μπορεί να έρχεται σε επαφή με την μέγιστη δυνατή εξωτερική επιφάνεια κάθε κάψουλας ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας. Με αυτό τον τρόπο το ρευστό αφού εισέλθει στην δεξαμενή και αφού πρώτα διαχυθεί ομοιογενώς μέσα σε αυτή (με την βοήθεια ενός συστήματος διάχυσης) έρχεται σε επαφή με τις κάψουλες και γίνεται ανταλλαγή θερμότητας είτε για την αποθήκευσή της είτε αντίστοιχα για την ανάκτησή της.



Σχήμα 2.10: PCM τοποθετημένο σε κάψουλες πολυαιθυλενίου [12].

2.4 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ

2.4.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναλυθεί προηγουμένως, ο πιο κοινός τρόπος αποθήκευσης θερμότητας είναι η αποθήκευση αισθητής θερμότητας, κατά την οποία ένα υλικό, υγρό ή στερεό, ανάλογα με τις τιμές της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας του, υφίσταται ύψωση της θερμοκρασίας του. Η άλλη μέθοδος αποθήκευσης θερμότητας είναι η αποθήκευση μέσω αλλαγής φάσης του υλικού, η οποία εξαρτάται από τη λανθάνουσα θερμότητα του υλικού αλλαγής φάσης, κατά την τήξη ή την πήξη του, με αποτέλεσμα να αποθηκεύεται περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα βάρους και όγκου του μέσου.

Ένας άλλος τρόπος αποταμίευσης ηλιακής ενέργειας, ως εναλλακτική λύση των δύο προηγούμενων, είναι η αποθήκευση θερμότητας με αντιστροφή χημικών αντιδράσεων, κατά την οποία μια χημική ουσία χωρίζεται σε δύο συστατικά με θέρμανση και απορρόφηση θερμότητας, τα οποία επανασυνδυαζόμενα παράγουν θερμότητα όταν και όπου αυτή απαιτείται.

2.4.2 Θερμοχημική αποθήκευση ενέργειας

Όπως η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης βελτιώνει τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας σε σύγκριση με τη χρήση νερού ή αδρανών υλικών, έτσι και η τεχνολογία της θερμοχημικής αποθήκευσης είναι βελτιωμένη έναντι της αποθήκευσης θερμότητας μέσω αλλαγής φάσης.

Τα θερμοχημικά συστήματα βασίζονται στην ενέργεια που απορροφάται και απελευθερώνεται όταν σπάνε και επαναδημιουργούνται οι μοριακοί δεσμοί σε μια εντελώς αντιστρέψιμη: αντίδραση. Σε αυτήν την περίπτωση, η ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας, η οποία δίνεται από την παρακάτω εξίσωση, εξαρτάται από την ποσότητα του αποθηκευτικού μέσου, την ενδοθερμική θερμότητα αντίδρασης και την έκταση της μετατροπής.

$$Q = a_r \cdot m \cdot \Delta H_r$$

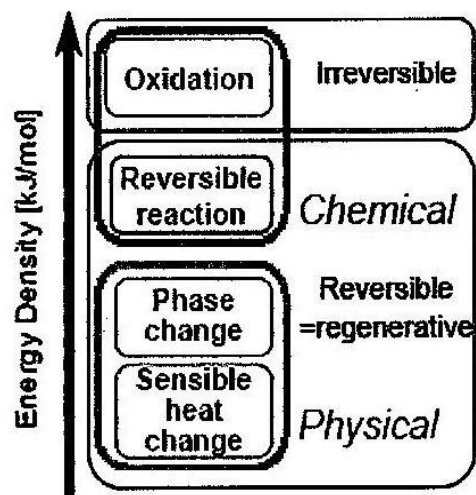
όπου:

Q: η ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας σε Joules

a_r : ποσοστό που αντιδρά, m: μάζα

ΔH_r : η θερμότητα αντίδρασης ανά μονάδα μάζας

Η ελκυστικότητα αυτής της μορφής αποθήκευσης θερμότητας έγκειται κυρίως στην **υψηλή ενεργειακή πυκνότητα**, η οποία όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.11 είναι μεγαλύτερη για χημικές μεταβολές, σε σύγκριση με την ενεργειακή πυκνότητα στις φυσικές μεταβολές, όπως η αλλαγή θερμοκρασίας για αποθήκευση αισθητής θερμότητας και η αλλαγή φάσης [16]. Έτσι τα δοχεία αποθήκευσης είναι μικρότερα κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε **χαμηλότερο κόστος**.



Σχήμα 2.11: Ενεργειακή πυκνότητα φυσικών και χημικών μεταβολών.

Γενικά, το κόστος ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συνδέεται με το κόστος ισχύος και το κόστος ενέργειας. Το κόστος ισχύος σχετίζεται με τη μεταφερόμενη ενέργεια από ή προς τη μονάδα αποθήκευσης και περιλαμβάνει το κόστος των εναλλακτών θερμότητας, των χημικών αντιδραστήρων, των αντλιών και των συστημάτων συμπίεσης. Το κόστος ενέργειας συνδέεται με την ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας και περιλαμβάνει το κόστος των μέσων αποθήκευσης (χημικών ουσιών και δοχείων αποθήκευσης) και των συστημάτων θερμικής μόνωσης. Στα θερμοχημικά συστήματα οι συσκευές ισχύος ξεχωρίζουν, φυσικά, από τα δοχεία αποθήκευσης, τις ουσίες και τα συστήματα μόνωσης. Αυτό, όμως, δε συμβαίνει στα άλλα συστήματα αποθήκευσης. Ακόμη, στα θερμοχημικά συστήματα το κόστος ενέργειας είναι χαμηλό (αφού δεν χρειαζόμαστε π.χ. θερμική μόνωση). Έχει διαπιστωθεί ότι για μικρούς χρόνους αποθήκευσης το κόστος ισχύος καθορίζει το συνολικό κόστος. Αυτό σημαίνει ότι τα θερμοχημικά συστήματα πλεονεκτούν έναντι των άλλων όταν απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι αποθήκευσης. Παρ' όλα αυτά, τα θερμοχημικά συστήματα αποθήκευσης σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι εύχρηστα λόγω των πολλών δοχείων και στοιχείων ισχύος που απαιτούν, γεγονός το οποίο χαμηλώνει και την αποδοτικότητά τους [8].

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα, είναι ότι η θερμότητα **μπορεί να αποταμιευθεί για απροσδιόριστο χρόνο**, χωρίς απώλειες ενέργειας και η επανάκτηση της ενέργειας να γίνει οποτεδήποτε και οπουδήποτε με την επανένωση των προϊόντων. Υπάρχει ακόμα και η δυνατότητα αποθήκευσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος πράγμα που μειώνει τις απώλειες θερμότητας. Αντίθετα στις άλλες μεθόδους αποθήκευσης, ακόμα και καλά μονωμένα συστήματα χάνουν σταδιακά την αποθηκευμένη θερμότητα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του συστήματος αποθήκευσης. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά, τόσο μικρότερο είναι το χρονικό διάστημα αποθήκευσης. Ωστόσο, τα θερμοχημικά συστήματα, πέρα από τα συγκριτικά τους πλεονεκτήματα, παρουσιάζουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει η πιθανότητα παράπλευρων ανεπιθύμητων αντιδράσεων[103]

Σε ότι αφορά την τεχνολογία των θερμοχημικών συστημάτων, έχουν εισαχθεί δύο όροι, ο χημικός θερμοσωλήνας (chemical heat ripe) και η χημική αντλία θερμότητας (chemical heat pump), προκειμένου να περιγράψουν τις λειτουργίες των χημικών συστημάτων. Ο πρώτος όρος αφορά σε χημικό σύστημα, το οποίο επιτρέπει τη **μεταφορά της αποθηκευμένης ενέργειας**, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ακόμα και για μεγάλες αποστάσεις. Ανάλογα με τη χημική αντίδραση που θα επιλέξουμε, είναι εφικτό να έχουμε έναν ενδόθερμο αντιδραστήρα που θα βρίσκεται στον τόπο παραγωγής και δέσμησης της θερμότητας και έναν εξώθερμο αντιδραστήρα που θα βρίσκεται στον τόπο απόληψης της ενέργειας (μέσω της μεταφοράς των αντιδρώντων ή των παραγομένων ουσιών). Ο δεύτερος όρος αφορά σε χημικό σύστημα που επιτρέπει την ενίσχυση της θερμικής ενέργειας μέσω αύξησης της θερμοκρασίας ή τη δυνατότητα βελτίωσης της αποδοτικότητας των κύκλων με απορρόφηση θερμότητας από το περιβάλλον.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός χημικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό του είναι:

- Η χωρητικότητα του δοχείου αποταμιεύσεως
- Το είδος της δεξαμενής αποταμιεύσεως
- Το κόστος του συστήματος αποταμιεύσεως
- Η έκταση της θερμοκρασίας μέσα στην οποία εργάζεται το σύστημα (δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία η θερμότητα αποταμιεύεται)
- Η ελάχιστη θερμοκρασία που απαιτείται από το σύστημα θέρμανσης ή ψύξης.

2.4.3 Βασικές αρχές της θερμοχημικής αποθήκευσης θερμότητας



Σε αυτή την αντίδραση ένα θερμοχημικό υλικό (C) απορροφά ενέργεια και μετατρέπεται σε δύο συστατικά (A και B) που μπορούν να αποθηκευτούν ξεχωριστά. Η αντίστροφη αντίδραση συμβαίνει όταν τα υλικά A και B συνδυάζονται μεταξύ τους και δημιουργείται το υλικό C. Κατά την διάρκεια αυτής της αντίδρασης απελευθερώνεται θερμότητα η οποία είναι ίση με την θερμότητα που δεσμεύτηκε κατά την διάρκεια της αποθήκευσης. Η χωρητικότητα αποθήκευσης αυτού του συστήματος είναι ίση με την θερμότητα της αντίδρασης σχηματισμού του υλικού C.

Κατά την διάρκεια μίας αντίδρασης θερμοχημικής αποθήκευσης θερμότητας που εκφράζεται ως: $C + \text{θερμότητα} \Leftrightarrow A + B$, το C είναι το θερμοχημικό υλικό (TCM) για την αντίδραση, ενώ τα υλικά A και B είναι τα αντιδραστήρια. Το υλικό A μπορεί να είναι υδροξείδιο, υδρίτης, ανθρακικό άλας, αμμωνιακό κ.ά. Το υλικό B μπορεί να είναι νερό, μονοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία, υδρογόνο κ.ά. Δεν υπάρχει περιορισμός στις φάσεις αλλά γενικά το υλικό C συνήθως είναι στερεό ή υγρό και τα υλικά A και B μπορούν να βρίσκονται σε οποιαδήποτε φάση. Γενικά ένας κύκλος αποθήκευσης θερμότητας περιέχει τρία βασικά στάδια [17]:

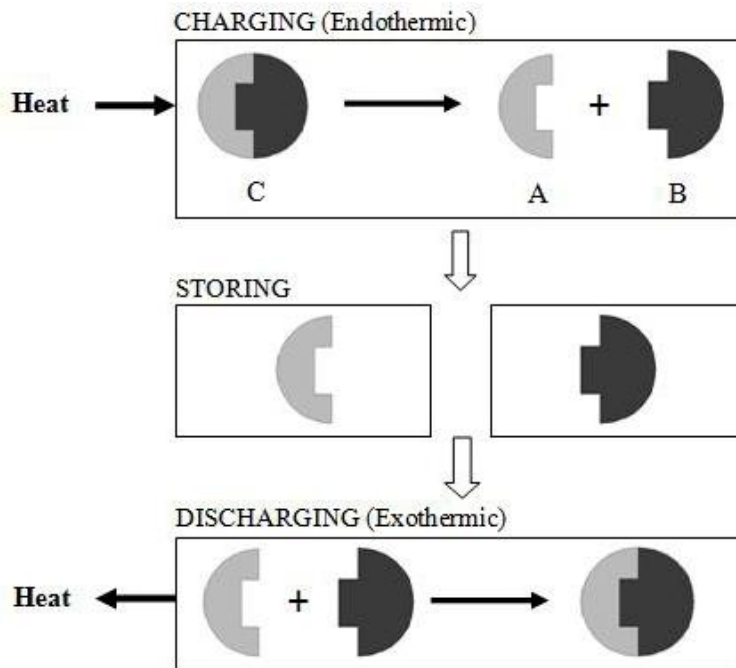
- Φόρτιση
- Αποθήκευση
- Αποφόρτιση

Τα παραπάνω στάδια για αποθήκευσης θερμικής ενέργειας φαίνονται στο διάγραμμα 28 και περιγράφονται εκτενώς παρακάτω:

Φόρτιση: Η διαδικασία της φόρτισης είναι ενδόθερμη. Θερμότητα απορροφάται από έναν πόρο ενέργειας που μπορεί να είναι ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή ένας συμβατικός πόρος ενέργειας όπως τα ορυκτά καύσιμα. Αυτή η ενέργεια χρησιμοποιείται για την διάσταση του θερμοχημικού υλικού και είναι ίση με την θερμότητα αντίδρασης ή αλλιώς την ενθαλπία σχηματισμού. Μετά το πέρας της διαδικασίας, τα δύο υλικά (A και B) με διαφορετικές ιδιότητες μπορούν να αποθηκευτούν. Η αντίδραση κατά την διάρκεια της φόρτισης είναι η παρακάτω:

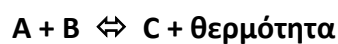


Αποθήκευση: Μετά την διαδικασία της φόρτισης τα συστατικά A και B αποθηκεύονται ξεχωριστά με λίγες ή σχεδόν μηδενικές απώλειες ενέργειας. Τα υλικά συνήθως αποθηκεύονται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος κάτι το οποίο μας οδηγεί σε μηδενικές απώλειες θερμότητας (εξαίρεση αποτελεί η αρχική ψύξη των συστατικών A και B μετά την φόρτιση). Οποιοσδήποτε άλλες απώλειες ενέργειας οφείλονται στην αποδόμηση των υλικών.



Σχήμα 2.12: Διεργασίες που πραγματοποιούνται σε έναν θερμοχημικό κύκλο αποθήκευσης θερμότητας: Φόρτιση, αποθήκευση, αποφόρτιση [17].

Αποφόρτιση: Κατά την διάρκεια αυτής της διεργασίας, τα υλικά A και B συμμετέχουν σε μία εξώθερμη αντίδραση. Η ενέργεια που απελευθερώνεται από αυτή την αντίδραση επιτρέπει την ανάκτηση της ενέργειας που δεσμεύτηκε κατά την αποθήκευση. Μετά την αποφόρτιση το συστατικό C επαναδημιουργείται και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί στον επόμενο κύκλο. Η αντίδραση αποφόρτισης έχει την μορφή:



2.4.4 Θερμοχημικά υλικά (TCM)

Μερικά υποσχόμενα θερμοχημικά υλικά που έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3 μαζί με τις τιμές της ενεργειακής πυκνότητας και της θερμοκρασίας αντίδρασης. Η ενεργειακή πυκνότητα και η θερμοκρασία αντίδρασης αποτελούν, ανάμεσα σε άλλες, δύο πολύ σημαντικές παράμετροι για ένα θερμοχημικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί σε μια εφαρμογή θερμοχημικής αποθήκευσης θερμότητας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για την επιλογή ενός θερμοχημικού υλικού συνήθως εξετάζονται μια σειρά από διάφορες παραμέτρους όπως:

- Κόστος υλικού
- Θερμοχημική συμπεριφορά του υλικού (κρίνεται με βάση την αντιστρεψιμότητα και την αποδόμηση του υλικού μετά από μεγάλο αριθμό φορτίσεων-αποφορτίσεων)
- Διαθεσιμότητα
- Τοξικότητα και ασφάλεια
- Διαβρωτικότητα
- Ενεργειακή πυκνότητα
- Θερμοκρασία αντίδρασης
- Ρυθμός αντίδρασης
- Μηχανικές ιδιότητες του υλικού (πχ: ιδιότητες ροής του υλικού, ρυθμός μεταφοράς θερμότητας κτλ.)

| Θερμοχημικό υλικό (C) | Στερεό αντιδρόν (A) | Φέρον ρευστό (B) | Ενεργειακή πυκνότητα του θερμοχημικού υλικού(GJ/m ³) | Θερμοκρασία αντίδρασης φόρτισης |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------|---|---------------------------------|
| MgSO ₄ ·7H ₂ O | MgSO ₄ | 7H ₂ O | 2,8 | 122 |
| FeCO ₃ | FeO | CO ₂ | 2,6 | 180 |
| Ca(OH) ₂ | CaO | H ₂ O | 1,9 | 479 |
| Fe(OH) ₂ | FeO | H ₂ O | 2,2 | 150 |
| CaCO ₃ | CaO | CO ₂ | 3,3 | 837 |
| CaCO ₄ ·2H ₂ O | CaSO ₄ | 2H ₂ O | 1,4 | 89 |

Πίνακας 2.3: Υποσχόμενα υλικά για θερμοχημική αποθήκευση ενέργειας [17].

2.4.5 Σύγκριση της θερμοχημικής αποθήκευσης θερμότητας με άλλους τρόπους αποθήκευσης θερμότητας

Αφού αναλύθηκαν στις παραπάνω σελίδες τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της θερμοχημικής αποθήκευσης θερμότητας, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μία σύγκριση αυτού του τρόπου αποθήκευσης θερμότητας με τους υπόλοιπους. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι σημαντικότερες ομοιότητες και διαφορές ανάμεσα στους τρεις τρόπους αποθήκευσης θερμότητας:

| Επίδοση Παραμέτρου | Τύποι Θερμικής Αποθήκευσης Ενέργειας | | |
|----------------------------------|--|--|--|
| | Αισθητή Θερμότητα | Λανθάνουσα Θερμότητα | Θερμοχημική αντίδραση |
| Θερμοκρασιακό Εύρος | μέχρι και: 110° (δεξαμενές νερού) 50°C (υδροφορείς και υπόγεια αποθήκευση) 400°C (σκυρόδεμα) | 20 - 40°C (παραφίνες) 30 - 80°C (ένυδρα άλατα) | 20 - 200°C |
| Πυκνότητα Αποθήκευσης | χαμηλή (με υψηλό θερμοκρασιακό διάστημα): 0,2 GJ/m ³ (για τυπικές δεξαμενές νερού) | μεσαία (με χαμηλό θερμοκρασιακό διάστημα): 0,3 – 0,5 GJ/m ³ | Κανονικά με: 0,5 – 3 GJ/m ³ |
| Χρόνος Ζωής | μεγάλος | συχνά περιορισμένος λόγω των πολλών κύκλων των υλικών αποθήκευσης | εξαρτάται από την αποδόμηση του αντιδρώντος και τις πλευρικές αντιδράσεις |
| Διαθεσιμότητα Τεχνολογίας | εμπορικά διαθέσιμη | εμπορικά διαθέσιμη για ορισμένες θερμοκρασίες και υλικά | Γενικώς εμπορικά μη διαθέσιμη (πραγματοποιείται έρευνα καθώς και δοκιμές σε πιλοτικά έργα) |
| Πλεονεκτήματα | μικρό κόστος, σχετικότητα, απλή εφαρμογή με διαθέσιμα υλικά | μεσαία πυκνότητα αποθήκευσης, μικροί όγκοι, δυνατότητα μεταφοράς για μικρές αποστάσεις | υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης, μικρές απώλειες ενέργειας, δυνατότητα μακροαποταμίευσης, δυνατότητα μεταφοράς σε μεγάλες αποστάσεις, ιδιαίτερα συμπαγής αποθήκευση ενέργειας |
| Μειονεκτήματα | σημαντικές απώλειες θερμότητας κατά την διάρκεια του χρόνου (ανάλογες του βαθμού μόνωσης), απαίτηση μεγάλου όγκου | χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, διάβρωση των υλικών, σημαντικές απώλειες θερμότητας κατά την διάρκεια του χρόνου (ανάλογες του βαθμού μόνωσης) | υψηλά κόστη κεφαλαίου, τεχνική πολυπλοκότητα |

2.5. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΡΟΦΗΣΗΣ

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας που βασίζονται σε διεργασίες που έχουν σχέση με ροφητικά φαινόμενα όπως αυτό της προσρόφησης (adsorption) και της απορρόφησης (absorption).

Προσρόφηση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο επιφάνειες στερεών ή υγρών σωμάτων συγκρατούν ξένες ουσίες από αέρια ή υγρά (μίγματα). Η επιφάνεια που συγκρατεί την ουσία λέγεται προσροφητικό μέσο (absorbent) ενώ ή προσροφούμενη ουσία λέγεται προσροφούμενη ουσία (absorbant). Η διαφορά του φαινομένου της προσρόφησης από αυτό της απορρόφησης συνίσταται στο γεγονός ότι, κατά την προσρόφηση, η προσροφούμενη ουσία συσσωρεύεται στην επιφάνεια του προσροφητικού μέσου, ενώ αντίθετα κατά την απορρόφηση μόρια της ξένης ουσίας διεισδύουν ανάμεσα στα μόρια του απορροφητικού μέσου. Η προσρόφηση μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες, στην φυσική προσρόφηση (physical adsorption/physiorption) που οφείλεται στις δυνάμεις Van Der Waals και στην χημική προσρόφηση/χημειορόφηση (chemisorption) που οφείλεται στις δυνάμεις των χημικών δεσμών. Επίσης η απορρόφηση ανάλογα με το αν συμβαίνουν κατά την διάρκειά της χημικές αντιδράσεις χωρίζεται στην φυσική απορρόφηση (physical absorption) και στην χημική απορρόφηση (chemical absorption).

Η προσρόφηση και η απορρόφηση είναι δύο φαινόμενα που μας ενδιαφέρουν γιατί κατά την πραγματοποίησή τους προσλαμβάνεται θερμότητα από το προσροφητικό μέσο, η οποία μπορεί με αντίστροφο τρόπο να αποδοθεί στο περιβάλλον όταν αυτό ζητηθεί. Συνεπώς οδηγούμαστε σε μία μορφή αποθήκευσης της θερμότητας.

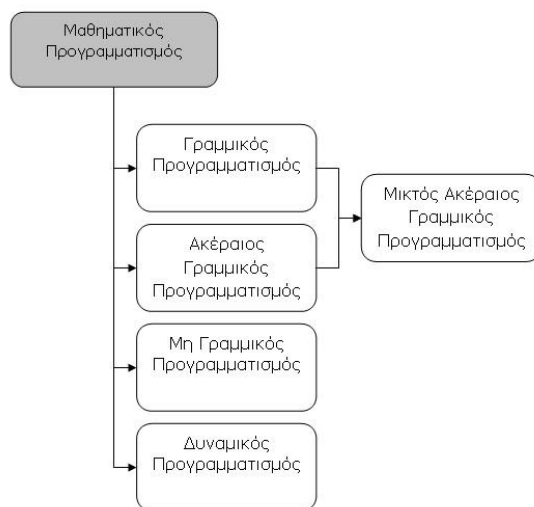
Τα φαινόμενα προσρόφησης και απορρόφησης λόγω των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν σε σχέση με την μεταφορά θερμότητας, χρησιμοποιούνται συνήθως για την αποθήκευση θερμότητας σε μηχανήματα και συστήματα που έχουν ως στόχο την ψύξη ενός χώρου. Τέτοια μηχανήματα μπορεί να είναι ο ψύκτης προσρόφησης (adsorption chiller) και ο ψύκτης απορρόφησης (absorption chiller) καθώς κι ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να είναι ένα σύστημα ηλιακού κλιματισμού. Για την αποθήκευση θερμότητας που έχει ως στόχο την ανάκτησή της όταν αυτό χρειαστεί στο μέλλον, έχουν προταθεί κάποια συστήματα με κύκλους προσρόφησης και απορρόφησης που εξυπηρετούν το σκοπό αυτό (παραπομπή σορψιον). Όμως η τεχνολογία αυτή βρίσκεται σε πολύ αρχικά στάδια κι έχει ελάχιστες εφαρμογές οι οποίες είναι συνήθως πιλοτικές, δηλαδή καθαρά για την έρευνα και τον πειραματισμό με την μέθοδο αυτή. Γι' αυτό τον σκοπό δεν γίνεται περαιτέρω ανάλυση αυτής της τεχνολογίας στην εργασία αυτή.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

3.1.1 Γενικά

Ο γραμμικός προγραμματισμός ανήκει στην ευρύτερη περιοχή του μαθηματικού προγραμματισμού (mathematical programming) βασικό χαρακτηριστικό της οποίας είναι η χρήση μαθηματικών μοντέλων για την αναπαράσταση των προς επίλυση προβλημάτων. Στο Σχήμα 3.1 μπορούμε να δούμε κάποιες από τις περιοχές του μαθηματικού προγραμματισμού. Ο επιθετικός προσδιορισμός «γραμμικός» σημαίνει ότι όλες οι μαθηματικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο είναι γραμμικές. Ο δε όρος δεν σχετίζεται με τον προγραμματισμό Η/Υ αλλά νοείται ως συνώνυμος του σχεδιασμού (planning). Δηλαδή, το μοντέλο του γραμμικού προγραμματισμού αναφέρεται στο σχεδιασμό δραστηριοτήτων κατά τρόπο που να επιτυγχάνεται ένα βέλτιστο αποτέλεσμα [18].



Σχήμα 3.1: Περιοχές μαθηματικού προγραμματισμού [19].

Ο γραμμικός προγραμματισμός (linear programming) αποτελεί αναμφίβολα το δημοφιλέστερο μοντέλο στο χώρο της επιχειρησιακής έρευνας αλλά και της διοικητικής επιστήμης (management science) γενικότερα. Η μεγάλη επιτυχία που είχε σε εφαρμογές του σε προβλήματα λήψης αποφάσεων των ιδιωτικών και δημόσιων επιχειρήσεων και οργανισμών αποδίδεται, από τη μια πλευρά στα επιτεύγματα της έρευνας μαθηματικών και οικονομολόγων σε θεωρητικό επίπεδο και από την άλλη πλευρά στην επαναστατική ανέλιξη της πληροφορικής επιστήμης

και τεχνολογίας. Κυριαρχεί σήμερα η αντίληψη ότι, τρεις στις τέσσερις εφαρμογές μοντέλων επιχειρησιακής έρευνας σε πραγματικά προβλήματα διοίκησης παραπέμπουν στο γραμμικό προγραμματισμό.

Ο γραμμικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται από τους επιχειρησιακούς ερευνητές ή τους αναλυτές προβλημάτων απόφασης για τη προσέγγιση προβλημάτων κατανομής περιορισμένων πόρων ή μέσων σε εναλλακτικές και ανταγωνιστικές μεταξύ τους δραστηριότητες κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Πρόκειται για το γνωστό πρόβλημα κατανομής της “πίτσας” (resource allocation problem). Ένα τέτοιο πρόβλημα απόφασης αυτής της μορφής είναι, για παράδειγμα, η κατανομή εργατικού δυναμικού, τεχνολογικού εξοπλισμού και πρώτων υλών σε διάφορες παραγωγικές διαδικασίες, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής. Άλλο πρόβλημα θα μπορούσε να είναι η κατανομή κεφαλαίου σε διάφορα επενδυτικά προγράμματα με σκοπό την μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους [20].

3.1.2 Μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού

Ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού αποτελείται από μια αντικειμενική συνάρτηση (objective function) η οποία εκφράζει το στόχο που θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε ή ελαχιστοποιήσουμε και από ένα σύνολο περιορισμών (δυναμικότητας, διαθεσιμότητας πόρων, τεχνολογίας, κλπ.), που εκφράζουν τους περιορισμούς του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο πρέπει να ληφθεί η απόφαση. Γενικό χαρακτηριστικό των μοντέλων γραμμικού προγραμματισμού είναι ότι τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και οι περιορισμοί του προβλήματος εκφράζονται ως μαθηματικές γραμμικές συναρτήσεις [21].

Τα βασικά συστατικά ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού είναι τα ακόλουθα:

Μεταβλητές απόφασης: Αποτελούν ουσιαστικά τους αγνώστους του προβλήματος και είναι οι μεταβλητές οι οποίες μπορούν να αλλάξουν και να πάρουν την τιμή την οποία επιθυμεί ο αποφασίζων. Η διαδικασία βελτιστοποίησης αποσκοπεί στο να βρεθούν οι τιμές εκείνες για τις μεταβλητές απόφασης οι οποίες βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση.

Αντικειμενική συνάρτηση: Αποτελεί τη μαθηματική σχέση των μεταβλητών απόφασης που εκφράζει το κριτήριο βελτιστοποίησης. Επιδιώκεται είτε η ελαχιστοποίηση είτε η μεγιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Περιορισμοί: Είναι οι μαθηματικές σχέσεις που καθορίζουν το εύρος τιμών που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές απόφασης στη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Καθορίζουν δηλαδή το πεδίο ορισμού του προβλήματος. Οι περιορισμοί μπορεί να είναι γραμμικές ισότητες ή ανισώσεις.

Παράμετροι: Είναι τα εξωγενώς οριζόμενα (εκτός του ελέγχου του αποφασίζοντος) μεγέθη του προβλήματος. Πρόκειται ουσιαστικά για τους γνωστούς όρους του προβλήματος οι οποίοι έχουν σταθερή τιμή στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Συνήθως είναι συντελεστές των μεταβλητών απόφασης ή εκφράζουν ποσότητες απαραίτητες στη διαμόρφωση των περιορισμών (π.χ. την απαιτούμενη ζήτηση μιας δραστηριότητας).

3.1.3 Είδη γραμμικού προγραμματισμού

Ο γραμμικός προγραμματισμός μπορεί να καταταγεί σε κατηγορίες ανάλογα με το είδος των μεταβλητών απόφασης, αν δηλαδή είναι **συνεχείς ή ακέραιες** μεταβλητές. Συνεχείς μεταβλητές είναι μεταβλητές οι οποίες μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε πραγματική τιμή. Ακέραιες είναι οι μεταβλητές οι οποίες μπορούν να λάβουν μόνο ακέραιες τιμές. Τέτοιες μεταβλητές είναι, για παράδειγμα, αυτές που δηλώνουν αριθμό εργατών, αριθμό εργοστασιακών μονάδων, αποφάσεις χρηματοδότησης ή μη χρηματοδότησης ενός έργου, κλπ. Αν ένα μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού έχει αποκλειστικά ακέραιες μεταβλητές χαρακτηρίζεται ως **μοντέλο ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού** (integer linear programming). Αν έχει και συνεχείς και ακέραιες μεταβλητές χαρακτηρίζεται ως **μοντέλο μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού** (mixed linear integer programming).

Τα προβλήματα που έχουν μόνο συνεχείς μεταβλητές είναι πιο εύκολο να λυθούν σε σχέση με αυτά που έχουν ακέραιες μεταβλητές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το εφικτό χωρίο σε ένα πρόβλημα με ακέραιες μεταβλητές παρουσιάζει ασυνέχειες δυσκολεύοντας έτσι κατά πολύ τη διαδικασία επίλυσης. Από την άλλη μεριά όμως η δυνατότητα χρήσης ακεραίων μεταβλητών δίνει τη δυνατότητα μιας πιο ρεαλιστικής μοντελοποίησης της πραγματικότητας και επίσης επεκτείνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογής του μαθηματικού προγραμματισμού και σε προβλήματα που έχουν συνδυαστικό χαρακτήρα (συνδυαστική βελτιστοποίηση), τα οποία χωρίς τη χρήση ακεραίων μεταβλητών θα ήταν αδύνατο να λυθούν. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων οι ακέραιες μεταβλητές που συναντώνται σε μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού είναι δυαδικές μεταβλητές, δηλαδή παίρνουν τιμή 0 ή 1. Τα προβλήματα αυτά καλούνται προβλήματα **δυαδικού ακέραιου προγραμματισμού**. Σε αυτά τα προβλήματα η χρήση μιας δυαδικής μεταβλητής συνίσταται στο να κωδικοποιήσουμε μια απόφαση μεταξύ δύο εναλλακτικών που θα πρέπει να ληφθεί στο πρόβλημα. Η τιμή που θα πάρει η

μεταβλητή απόφασης κατά την επίλυση δείχνει ποια απόφαση πρέπει να επιλεγεί ώστε να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση. [21]

3.1.4 Η μέθοδος SIMPLEX

Το 1947 ο G. B. Dantzig, ανέπτυξε τον αλγόριθμο Simplex για την επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού. Ταυτόχρονα, σχεδόν, αναπτύχθηκε και ο πρώτος υπολογιστής, οπότε υπήρχαν τα μέσα για την επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού μεγάλης κλίμακας. Η ταυτόχρονη και ταχύτατη ανάπτυξη τεχνικών προγραμματισμού, από την μια, και της υπολογιστικής ισχύος, από την άλλη, έδωσε τη δυνατότητα για ανάλυση μεγάλων και πολύπλοκων προβλημάτων [19].

Η μέθοδος Simplex πρόκειται για επαναληπτικό σχήμα μέσω του οποίου βελτιώνεται σε κάθε βήμα η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ώσπου να αποκτηθεί η βέλτιστη λύση. Είναι μία μέθοδος που προγραμματίζεται εύκολα και ενδείκνυται για πολύπλοκα μοντέλα. Υπάρχει πληθώρα υπολογιστικών πακέτων γραμμικού προγραμματισμού με βάση την simplex ή παραλλαγές της. Σήμερα, ο κύρια μέθοδος επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού είναι η μέθοδος Simplex.

3.1.5 Η γλώσσα GAMS

Το Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Μοντελοποίησης GAMS (General Algebraic Modelling System) είναι ένα υπολογιστικό εργαλείο το οποίο προσφέρει ένα εργασιακό περιβάλλον που μας επιτρέπει την ανάλυση και την επίλυση διαφόρων μαθηματικών προβλημάτων όπως αυτό της βελτιστοποίησης μιας συνάρτησης ενός γραμμικού ή όχι προβλήματος.

Το σύστημα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για μεγάλα και πολυσύνθετα προβλήματα που έχουν πάρα πολλές μεταβλητές, ενώ επιτρέπει στο χρήστη να επικεντρωθεί στο πρόβλημα του μοντέλου με το να καταστήσει την οργάνωσή του απλή. Η γλώσσα, που χρησιμοποιεί το GAMS, είναι τυπικά παρόμοια με τις συνήθως χρησιμοποιούμενες γλώσσες προγραμματισμού, καθιστώντας την οικία σε οποιονδήποτε, που έχει κάποια επαφή με τον προγραμματισμό. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τη διατύπωση γρήγορα και εύκολα μετατρέποντας ένα γραμμικό πρόβλημα σε μη γραμμικό χωρίς μεγάλη δυσκολία.

Χρησιμοποιώντας το GAMS, τα στοιχεία εισάγονται μόνο μια φορά με τη γνωστή μορφή καταλόγων και πινάκων. Όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος

εισάγονται σε μια δήλωση και το GAMS παράγει αυτόματα περιορισμό για κάθε εξίσωση και αφήνει το χρήστη να κάνει τις εξαιρέσεις σε περιπτώσεις όπου η γενικότητα δεν επιδιώκεται. Επίσης ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει τον επιλυτή (solver) ο οποίος θα λύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης αφού εισάγει την αντικειμενική συνάρτηση. Ο σχεδιασμός στο GAMS έχει ενσωματώσει τις έννοιες, που προέρχονται από τη θεωρία βάσεων δεδομένων και το μαθηματικό προγραμματισμό και προσπαθεί να συγχωνεύσει αυτές τις ιδέες να ανταποκριθούν στις ανάγκες των σχεδιασμών των διάφορων μοντέλων [22].

3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE CARLO ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η προσομοίωση Monte Carlo

Η προσομοίωση Monte Carlo είναι μια ευέλικτη μέθοδος για την ανάλυση της συμπεριφοράς ορισμένων δραστηριοτήτων, προγραμμάτων ή διαδικασιών που αφορούν την αβεβαιότητα. Η μέθοδος αυτή εφευρέθηκε από επιστήμονες το 1944 περίπου, και ονομάστηκε έτσι από την πόλη του Μονακό, εξαιτίας μιας ρουλέτας, μια απλής γεννήτριας τυχαίων αριθμών.

Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια κατηγορία υπολογιστικών αλγορίθμων που στηρίζονται σε επαναλαμβανόμενες τυχαίες δειγματοληψίες για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων τους. Οι μέθοδοι αυτοί, χρησιμοποιούνται συχνά κατά την προσομοίωση φυσικής και μαθηματικών συστημάτων. Λόγω της εξάρτησης από τον επαναλαμβανόμενο υπολογισμό τυχαίων αριθμών, είναι οι πλέον κατάλληλες για τον υπολογισμό από ένα υπολογιστή. Τείνουν να χρησιμοποιούνται όταν είναι εφικτό ή αδύνατο να υπολογιστεί το ακριβές αποτέλεσμα με ντετερμινιστικό αλγόριθμο.

Οι μέθοδοι προσομοίωσης Monte Carlo είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στη μελέτη συστημάτων με μεγάλο αριθμό συνδυασμού βαθμού ελευθερίας, όπως τα υγρά, ισχυρά συνδεδεμένα στερεά, και η κυτταρική δομή. Γενικότερα, είναι χρήσιμες για τη μοντελοποίηση των φαινομένων με σημαντική αβεβαιότητα όσον αφορά τους διαθέσιμους πόρους, όπως ο υπολογισμός των κινδύνων στον τομέα των επιχειρήσεων (ανάλυση κινδύνου - ανάλυση ρίσκου). Επίσης χρησιμοποιούνται ευρέως στα μαθηματικά.

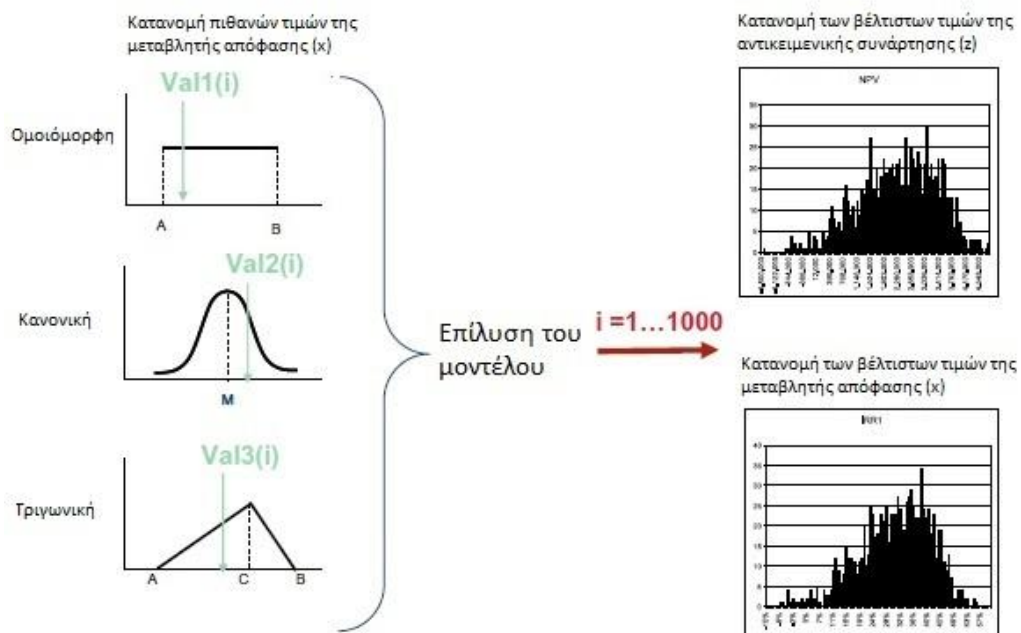
Η προσομοίωση Monte Carlo, υπολογίζει πολυάριθμα σενάρια ενός μοντέλου παίρνοντας επανειλημμένα τυχαίες τιμές από πιθανές κατανομές (ψευδοτυχαίοι αριθμοί) για τις αβέβαιες μεταβλητές. Οι πιθανές τιμές των αβέβαιων μεταβλητών συνήθως ακολουθούν κανονική, ομοιόμορφη ή και τριγωνική κατανομή [4].

Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Καθορισμός είδους κατανομών για κάθε αβέβαιη μεταβλητή (στοχαστική μεταβλητή)
- Καθορισμός παραμέτρων κατανομής
- Τυχαία δειγματοληψία από τις κατανομές και υπολογισμός μεταβλητών εξόδου
- Εκτέλεση προηγούμενου βήματος για μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (συνήθως 500 - 1000 επαναλήψεις)
- Δημιουργία κατανομών πιθανότητας για τις μεταβλητές εξόδου

- Ανάλυση αποτελεσμάτων με βάση τις πληροφορίες που μας δίνουν οι κατανομές των μεταβλητών εξόδου

Αφού γίνει η επίλυση του μοντέλου και η ανάλυση των αποτελεσμάτων, τότε βλέπουμε το κατά πόσο η αντικειμενική συνάρτηση και οι αβέβαιες μεταβλητές απόφασης μπορούν να ποικίλουν βοηθώντας μας να συμπεράνουμε πιο συγκεκριμένα την αβεβαιότητα των παραμέτρων του μοντέλου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Η Προσομοίωση Monte Carlo [4].

4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

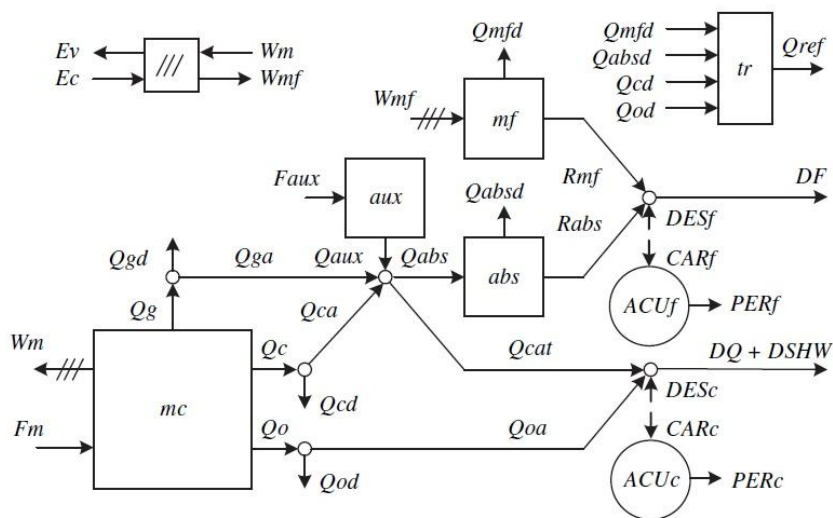
Η εργασία αυτή ασχολείται με την μοντελοποίηση ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας σε μια μεγάλη κτιριακή εγκατάσταση. Συγκεκριμένα στην περίπτωση μας, γίνεται η μοντελοποίηση ενός συστήματος συμπαραγωγής με δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας για ένα συγκρότημα 5.000 κατοικιών. Το συγκρότημα αυτό λειτουργεί με μονάδες συμπαραγωγής (mc) οι οποίες χρησιμοποιούν το φυσικό αέριο ως καύσιμο (Fm) για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (W_m) και θερμότητας (Q_g, Q_c, Q_o).

Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα [W_m (σε μορφή έργου)] πωλείται εξ' ολοκλήρου στο δίκτυο με εξαίρεση την περίπτωση της εξυπηρέτησης ορισμένων αναγκών σε ψύξη όπως αναφέρεται και παρακάτω. Αυτό γίνεται διότι υπάρχει δυσκολία παροχής όλων των ενεργειακών υπηρεσιών απευθείας από το σύστημα συμπαραγωγής προς στα κτίρια κατοικιών μιας και δεν υπάρχουν ακόμα οι κατάλληλοι μηχανισμοί. Επίσης κάτι τέτοιο σε ορισμένες περιπτώσεις συμφέρει οικονομικά λόγω του ευνοϊκού καθορισμού των τιμών αγοράς και πώλησης ρεύματος από τη σχετική νομοθεσία.

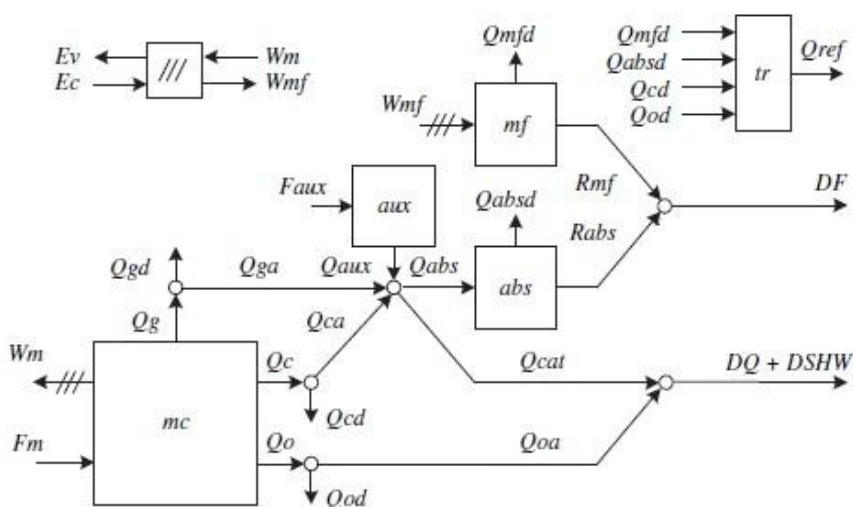
Οι ανάγκες ψύξης (DF), θέρμανσης (DQ) και ζεστών νερών χρήσης (DSHW), εξυπηρετούνται από την παραγόμενη θερμότητα (Q_g, Q_c, Q_o). Για την ψύξη χρησιμοποιούνται ψύκτες απορρόφησης (abs) οι οποίοι προκαλούν ψύξη χρησιμοποιώντας την παραγόμενη θερμότητα. Για την θέρμανση χώρων και τα ζεστά νερά χρήσης χρησιμοποιείται απευθείας η παραγόμενη θερμότητα. Σε περίπτωση που η παραγόμενη θερμότητα δεν είναι αρκετή για τις ανάγκες του συστήματος τότε χρησιμοποιούνται βοηθητικοί λέβητες (aux) που έχουν ως καύσιμο το φυσικό αέριο (Faux), οι οποίοι παρέχουν το απαιτούμενο ποσό θερμότητας. Ειδικά, στην περίπτωση όπου υπάρχει έλλειψη απαιτούμενης θερμότητας για ανάγκες ψύξης, μπορούν εναλλακτικά να χρησιμοποιηθούν ψύκτες συμπίεσης (mf) οι οποίοι καταναλώνουν ηλεκτρικό ρεύμα [W_{mf} (σε μορφή έργου)]. Στην περίπτωση που υπάρχει πλεονάζουσα παραγόμενη θερμότητα, αυτή μπορεί να αποθηκευτεί μέσω του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας με την μορφή θερμικής ενέργειας (CARc) και ψυκτικής ενέργειας (CARf) και να χρησιμοποιηθεί σε κάποια μελλοντική χρονική στιγμή.

Επίσης το σύστημα είναι εξοπλισμένο με πύργους ψύξης οι οποίοι διαχέουν ομαλά προς το περιβάλλον Θερμότητα (Q_{ref}) η οποία προέρχεται από απώλειες του συστήματος ($Q_{mfd}, Q_{absd}, Q_{cd}, Q_{od}$). Το σύστημα αυτό απεικονίζεται με περισσότερη λεπτομέρεια στο Σχήμα 4.1.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η τοποθέτηση μονάδων συμπαραγωγής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας σε μεγάλες εφαρμογές γίνεται κυρίως για οικονομικούς λόγους. Ένα αντίστοιχο σύστημα χωρίς μονάδες συμπαραγωγής που λειτουργεί αποκλειστικά με προμήθεια ηλεκτρικού ρεύματος από το δίκτυο για την εξυπηρέτηση των αναγκών του (ανάγκες σε ψύξη, θέρμανση, ζεστά νερά χρήσης), σε γενικές γραμμές, κοστίζει ακριβότερα μακροπρόθεσμα. Το διάγραμμα ροής ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Τα συστήματα συμπαραγωγής που έχουν επιπλέον την δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας θερμότητας, παρόμοια με αυτό που μελετάται στην εργασία αυτή, δύνανται να γίνουν ακόμα πιο οικονομικά από τα απλά συστήματα συμπαραγωγής όπως θα φανεί αφού γίνει η ανάλυσή τους.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής του συστήματος με δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας [1].



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής του συστήματος χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας [1].

5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

5.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ, ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για την μοντελοποίηση του συστήματος μας, χρειάστηκε αρχικά να γίνει ένας διαχωρισμός των παραμέτρων, των δεδομένων και των μεταβλητών προκειμένου να γίνει πιο εύκολη η κατάστρωση των εξισώσεων. Επίσης έγιναν κάποιες παραδοχές και απλοποιήσεις στο σύστημα ώστε να γίνει λιγότερο σύνθετο και κατανοητό.

Αρχικά, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως στο σύστημα μας θεωρήθηκε πως ένας χρόνος (yr) αντιστοιχεί σε 365 μέρες και η κάθε μέρα σε 24 ώρες (h). Για περεταίρω διευκόλυνση θεωρήθηκε πως σε κάθε μήνα αντιστοιχεί 1 τυπική μέρα. Για παράδειγμα, κάτι τέτοιο, σημαίνει πως αν εξετάσουμε μια συγκεκριμένη μέρα του Ιανουαρίου, αυτή από άποψη δεδομένων είναι ακριβώς ίδια με οποιαδήποτε άλλη μέρα αυτού του μήνα. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως όλες οι μέρες ενός μήνα αντιπροσωπεύονται από μια τυπική μέρα και άρα υπάρχουν συνολικά 12 τυπικές μέρες (d) εφόσον υπάρχουν 12 μήνες. Επίσης, η σύνθεση του συνόλου των 365 ημερών θεωρήθηκε πως είναι αυτή που παρουσιάζεται και αναλυτικά στον Πίνακα 5.1.

| Μήνας | Τυπική μέρα (d) | Αριθμός ημερών (nd) |
|-------------|-----------------|---------------------|
| Ιανουάριος | 1 | 31 |
| Φεβρουάριος | 2 | 28 |
| Μάρτιος | 3 | 31 |
| Απρίλιος | 4 | 30 |
| Μάιος | 5 | 31 |
| Ιούνιος | 6 | 30 |
| Ιούλιος | 7 | 31 |
| Αύγουστος | 8 | 31 |
| Σεπτέμβριος | 9 | 30 |
| Οκτώβριος | 10 | 31 |
| Νοέμβριος | 11 | 30 |
| Δεκέμβριος | 12 | 31 |

Πίνακας 5.1: Σύνθεση του συνόλου των ημερών ενός έτους.

Στο σύνολο των 24 ωρών μιας μέρας έγινε η κατηγοριοποίηση τους σε κανονικές ώρες [$relnormal(h)$], ώρες αιχμής [$reloffpeak(h)$] και ώρες χαμηλής ζήτησης [$relpeak(h)$]. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε διότι η τιμολόγηση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι αλλάζει ανάλογα με την ώρα που αγοράζεται και εμπίπτει στις

κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η κατηγοριοποίηση των ωρών φαίνεται στον Πίνακα 5.2.

| Κατηγορία | Ώρες |
|----------------------|-----------------|
| Ώρες αιχμής | 10 - 22 |
| Κανονικές ώρες | 1, 7-9, 23 - 24 |
| Ώρες χαμηλής ζήτησης | 2 - 6 |

Πίνακας 5.2: Διαχωρισμός των ωρών μιας ημέρας σε κατηγορίες.

Τα δεδομένα του μοντέλου είναι πίνακες ζήτησης σε MW των φορτίων ψύξης [DF(d,h)], θέρμανσης [DQ(d,h)] και ζεστών νερών χρήσης [DSHW(d,h)] οι οποίοι κατασκευάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε η ζήτηση να είναι ωριαία (24 ώρες) για κάθε ξεχωριστή τυπική μέρα (12 τυπικές μέρες).

Για την κατασκευή των πινάκων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από σχετική βιβλιογραφία [1], τα οποία όμως δεν ήταν αρκετά. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

| Τυπικές Μέρες (d) | Αριθμός τυπικών ημερών (nd) | ZNX | Ανάγκες θέρμανσης | Ανάγκες Ψύξης |
|-------------------|-----------------------------|-----------|-------------------|---------------|
| | | (kWh/day) | (kWh/day) | (kWh/day) |
| Ιανουάριος | 31 | 20359 | 186477 | 0 |
| Φεβρουάριος | 28 | 19643 | 144023 | 0 |
| Μάρτιος | 31 | 18174 | 89380 | 0 |
| Απρίλιος | 30 | 15506 | 30839 | 0 |
| Μάιος | 31 | 13039 | 0 | 0 |
| Ιούνιος | 30 | 11121 | 0 | 46684 |
| Ιούλιος | 31 | 6563 | 0 | 131899 |
| Αύγουστος | 31 | 3632 | 0 | 98093 |
| Σεπτέμβριος | 30 | 9431 | 0 | 40049 |
| Οκτώβριος | 31 | 13359 | 16798 | 0 |
| Νοέμβριος | 30 | 17344 | 111143 | 0 |
| Δεκέμβριος | 31 | 19251 | 213261 | 0 |
| | | (MWh/yr) | (MWh/yr) | (MWh/yr) |
| Έτος | 365 | 5078 | 23976 | 9732 |

Πίνακας 5 3: Ενεργειακές ανάγκες του συστήματος ανά τυπική μέρα.

| Ωρα (h) | ZNX (kW) | | Ανάγκες Θέρμανσης (kW) | Ανάγκες Ψύξης (kW) |
|---------|------------|-----------|------------------------|--------------------|
| | Ιανουάριος | Αύγουστος | Ιανουάριος | Αύγουστος |
| 1 | 350 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 14300 | 0 |
| 7 | 450 | 50 | 13700 | 0 |
| 8 | 900 | 150 | 13100 | 0 |
| 9 | 1350 | 250 | 12500 | 0 |
| 10 | 1800 | 400 | 11900 | 0 |
| 11 | 1400 | 250 | 11300 | 0 |
| 12 | 1050 | 150 | 10700 | 5500 |
| 13 | 700 | 100 | 10100 | 7100 |
| 14 | 1400 | 230 | 9500 | 8600 |
| 15 | 1250 | 150 | 8900 | 14300 |
| 16 | 1050 | 150 | 8300 | 20000 |
| 17 | 750 | 92 | 12800 | 16500 |
| 18 | 1050 | 180 | 11977 | 7000 |
| 19 | 1300 | 280 | 10200 | 6000 |
| 20 | 1600 | 400 | 10200 | 4800 |
| 21 | 1300 | 280 | 7500 | 4800 |
| 22 | 1080 | 180 | 9500 | 3493 |
| 23 | 879 | 140 | 0 | 0 |
| 24 | 700 | 100 | 0 | 0 |

Πίνακας 5.4: 24ωρο προφίλ ενεργειακών αναγκών του συστήματος για συγκεκριμένο μήνα.

Συγκεκριμένα έχουμε δεδομένα για τις ενεργειακές ανάγκες του συστήματος ανά τυπική μέρα (Πίνακας 5.3). Επίσης έχουμε 24ωρα προφίλ για τις ανάγκες του συστήματος σε ZNX τον Ιανουάριο και τον Αύγουστο καθώς και για τις ανάγκες σε θέρμανση τον μήνα Ιανουάριο και τις ανάγκες σε ψύξη τον μήνα Αύγουστο (Πίνακας 5.4).

Από τον Πίνακα 5.3 παρατηρούμε ότι ανάγκες σε θέρμανση υπάρχουν σε 7 μήνες, ανάγκες σε ψύξη σε 4 μήνες καθώς και 1 μήνας που δεν έχει ζήτηση σε θέρμανση ή ψύξη. Εδώ γίνεται η παραδοχή ότι όλοι οι μήνες που έχουν ανάγκες σε θέρμανση έχουν αντίστοιχο 24ωρο ενεργειακό προφίλ με αυτό του Ιανουαρίου. Το αντίστοιχο 24ωρο ενεργειακό προφίλ προκύπτει αναλογικά: Βρίσκουμε ξεχωριστά τον κάθε ωριαίο λόγο της ζήτησης σε θέρμανση (για τον μήνα Ιανουάριο) ως προς

την συνολική ζήτηση σε θέρμανση για την συγκεκριμένη ημέρα. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει το ποσοστιαίο 24ωρο προφίλ ζήτησης σε θέρμανση για τον μήνα Ιανουάριο. Θεωρούμε πως το προφίλ αυτό είναι ίδιο για όλους τους μήνες που έχουν ανάγκες σε θέρμανση. Αφού έχουμε την ημερήσια ζήτηση σε θέρμανση για κάθε έναν από τους μήνες αυτούς, τότε με απλό πολλαπλασιασμό της με το ποσοστιαίο 24ωρο προφίλ ζήτησης προκύπτει ο ωριαίος πίνακας ζήτησης θερμικών φορτίων για το σύστημά μας [DQ(d,h)] όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.5.

| DQ(d,h) MW | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|------|------|---|---|---|---|---|------|------|-------|
| d,h | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 14300 | 11044 | 6854 | 2365 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1288 | 8523 | 16354 |
| 7 | 13700 | 10581 | 6567 | 2266 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1234 | 8165 | 15668 |
| 8 | 13100 | 10118 | 6279 | 2166 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1180 | 7808 | 14982 |
| 9 | 12500 | 9654 | 5991 | 2067 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1126 | 7450 | 14295 |
| 10 | 11900 | 9191 | 5704 | 1968 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1072 | 7093 | 13609 |
| 11 | 11300 | 8727 | 5416 | 1869 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1018 | 6735 | 12923 |
| 12 | 10700 | 8264 | 5129 | 1770 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 964 | 6377 | 12237 |
| 13 | 10100 | 7801 | 4841 | 1670 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 910 | 6020 | 11551 |
| 14 | 9500 | 7337 | 4553 | 1571 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 856 | 5662 | 10865 |
| 15 | 8900 | 6874 | 4266 | 1472 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 802 | 5305 | 10178 |
| 16 | 8300 | 6410 | 3978 | 1373 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 748 | 4947 | 9492 |
| 17 | 12800 | 9886 | 6135 | 2117 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1153 | 7629 | 14638 |
| 18 | 11977 | 9250 | 5741 | 1981 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1079 | 7138 | 13697 |
| 19 | 10200 | 7878 | 4889 | 1687 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 919 | 6079 | 11665 |
| 20 | 10200 | 7878 | 4889 | 1687 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 919 | 6079 | 11665 |
| 21 | 7500 | 5793 | 3595 | 1240 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 676 | 4470 | 8577 |
| 22 | 9500 | 7337 | 4553 | 1571 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 856 | 5662 | 10865 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Πίνακας 5.5: Ωριαίος πίνακας ζήτησης θερμικών φορτίων του συστήματος.

Με αντίστοιχο τρόπο κατασκευάζεται και ο ωριαίος πίνακας ζήτησης ψυκτικών φορτίων για το σύστημά μας [DF(d,h)] όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.6.

Ο πίνακας ζήτησης των ZNX για το σύστημα προκύπτει με παρόμοιο τρόπο: Παρατηρούμε από τον Πίνακα 5.3 πως όλοι οι μήνες έχουν ανάγκες σε ZNX. Επίσης από τον Πίνακα 5.4 παρατηρούμε πως οι ενεργειακές ανάγκες σε ZNX παρουσιάζουν ελάχιστο τον μήνα Αύγουστο και μέγιστο τον μήνα Ιανουάριο. Γι'

αυτό τον λόγο θεωρούμε πως τα 24ωρα ενεργειακά προφίλ ζήτησης σε ZNX για τους υπόλοιπους μήνες θα πρέπει να είναι αναλογικά μικρότερα ή μεγαλύτερα από τα 24ωρα ενεργειακά προφίλ ζήτησης σε ZNX για τον Ιανουάριο και τον Αύγουστο. Στην συνέχεια κατασκευάζονται τα ποσοστιαία 24ωρα προφίλ ζήτησης για τον Ιανουάριο και τον Αύγουστο με τον τρόπο που περιγράφηκε στην προηγούμενη σελίδα. Βασιζόμενοι σε αυτά τα δύο προφίλ, με την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής κατασκευάζονται αναλογικά τα ποσοστιαία 24ωρα προφίλ ζήτησης για τους υπόλοιπους μήνες. Τέλος, αφού έχουμε την ημερήσια ζήτηση σε ZNX για κάθε έναν από τους μήνες αυτούς, τότε με απλό πολλαπλασιασμό της με το ποσοστιαίο 24ωρο προφίλ ζήτησης προκύπτει ο ωριαίος πίνακας ζήτησης ZNX για το σύστημά μας [DSHW(d,h)] όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.7.

| DF(d,h) MW | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|---|---|---|---|------|-------|-------|------|----|----|----|
| d,h | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2618 | 7395 | 5500 | 2246 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3379 | 9547 | 7100 | 2899 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4093 | 11564 | 8600 | 3511 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6806 | 19228 | 14300 | 5838 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9518 | 26893 | 20000 | 8166 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7853 | 22186 | 16500 | 6737 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3331 | 9412 | 7000 | 2858 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2855 | 8068 | 6000 | 2450 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2284 | 6454 | 4800 | 1960 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2284 | 6454 | 4800 | 1960 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1662 | 4697 | 3493 | 1426 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Πίνακας 5.6: Ωριαίος πίνακας ζήτησης ψυκτικών φορτίων του συστήματος.

| DSHW(d,h) MW | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| d,h | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 350 | 367 | 366 | 335 | 301 | 273 | 171 | 100 | 241 | 316 | 376 | 379 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 450 | 411 | 358 | 287 | 226 | 180 | 98 | 50 | 142 | 218 | 306 | 364 |
| 8 | 900 | 860 | 788 | 666 | 555 | 469 | 274 | 150 | 396 | 569 | 750 | 845 |
| 9 | 1350 | 1310 | 1218 | 1045 | 883 | 757 | 449 | 250 | 648 | 916 | 1186 | 1314 |
| 10 | 1800 | 1798 | 1720 | 1515 | 1315 | 1156 | 702 | 400 | 1003 | 1370 | 1711 | 1824 |
| 11 | 1400 | 1351 | 1250 | 1067 | 897 | 765 | 452 | 250 | 652 | 929 | 1212 | 1353 |
| 12 | 1050 | 984 | 884 | 731 | 596 | 492 | 281 | 150 | 405 | 597 | 805 | 928 |
| 13 | 700 | 656 | 589 | 488 | 397 | 328 | 187 | 100 | 270 | 398 | 537 | 618 |
| 14 | 1400 | 1335 | 1222 | 1030 | 856 | 722 | 421 | 230 | 608 | 876 | 1157 | 1307 |
| 15 | 1250 | 1150 | 1011 | 818 | 651 | 523 | 290 | 150 | 419 | 635 | 880 | 1038 |
| 16 | 1050 | 984 | 884 | 731 | 596 | 492 | 281 | 150 | 405 | 597 | 805 | 928 |
| 17 | 750 | 691 | 610 | 495 | 395 | 318 | 177 | 92 | 256 | 386 | 533 | 628 |
| 18 | 1050 | 1007 | 927 | 786 | 657 | 558 | 327 | 180 | 473 | 677 | 889 | 997 |
| 19 | 1300 | 1291 | 1229 | 1078 | 931 | 815 | 494 | 280 | 706 | 969 | 1219 | 1308 |
| 20 | 1600 | 1632 | 1592 | 1428 | 1260 | 1125 | 693 | 400 | 984 | 1317 | 1607 | 1670 |
| 21 | 1300 | 1291 | 1229 | 1078 | 931 | 815 | 494 | 280 | 706 | 969 | 1219 | 1308 |
| 22 | 1080 | 1032 | 946 | 799 | 666 | 562 | 329 | 180 | 475 | 683 | 900 | 1014 |
| 23 | 879 | 835 | 761 | 639 | 528 | 443 | 257 | 140 | 372 | 538 | 714 | 810 |
| 24 | 700 | 656 | 589 | 488 | 397 | 328 | 187 | 100 | 270 | 398 | 537 | 618 |

Πίνακας 5.7: Ωριαίος πίνακας ζήτησης ΖΝΧ του συστήματος.

Οι παράμετροι του μοντέλου υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας σχετική βιβλιογραφία [1] και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8.

| ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ | ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ |
|------------------------------|---|
| ΔΙΑΦΟΡΑ | |
| fam | Συντελεστής απόσβεσης |
| nbig | Μεγάλος ακέραιος αριθμός |
| rbig | Μεγάλος πραγματικός αριθμός |
| cf | Τιμή φυσικού αερίου (€ / kWh) |
| cqref | Κόστος απορριπτόμενης θερμότητας (€ / kWh) |
| ceoff | Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες εκτός αιχμής (€ / kWh) |
| cecnormal | Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε κανονικές ώρες (€ / kWh) |
| cecreak | Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες αιχμής (€ / kWh) |
| cevc | Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργεια σενάριο Γ (€ / kWh) |
| cec(h) | Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (€ / kWh) |
| ΜΟΝΑΔΕΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ | |
| wmnom | Ονομαστική ισχύς (kW) |
| r _{fw} | Αναλογία καυσίμου-ισχύος |
| r _{qg} | Θερμότητα καυσαερίων ανά έργο |
| r _{qc} | Θερμότητα χιτώνα ανά έργο |
| R _{qo} | Θερμότητα λιπαντικού λαδιού ανά έργο |
| imc | Επένδυση (€) |
| ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ | |
| q _{auxnom} | Ονομαστική ισχύς (kW) |
| r _{qf} | Αποδοτικότητα |
| iaux | Επένδυση (€) |
| ΨΥΚΤΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ | |
| r _{mfnom} | Ονομαστική ισχύς (kW) |
| c _{opmf} | Συντελεστής απόδοσης |
| imf | Επένδυση (€) |
| ΨΥΚΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ | |
| r _{absnom} | Ονομαστική ισχύς (kW) |
| c _{opabs} | Συντελεστής απόδοσης |
| i _{abs} | Επένδυση (€) |
| ΠΥΡΓΟΙ ΨΥΞΗΣ | |
| q _{refnom} | Ονομαστική ισχύς (kW) |
| itr | Επένδυση (€) |
| ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ | |
| i _{uc} | Κόστος μονάδας |
| f _{perc} | Συντελεστής απωλειών |
| ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΨΥΞΗΣ | |
| i _{uf} | Κόστος μονάδας |
| f _{perf} | Συντελεστής απωλειών |

Πίνακας 5.8: Λίστα παραμέτρων του μοντέλου σε κατηγορίες.

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου κατηγοριοποιούνται και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9. Από τις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν, αυτές που είναι σε κόκκινο χρώμα είναι οι μεταβλητές απόφασης, δηλαδή οι μεταβλητές οι οποίες είναι δυνατόν να αλλάξουν με την θέληση του χρήστη. Οι μεταβλητές απόφασης είναι και αυτές που μας ενδιαφέρουν καθώς αυτές θα ρυθμίσουμε κατάλληλα με την βοήθεια του γραμμικού προγραμματισμού, για να πετύχουμε την οικονομική λειτουργία του συστήματος.

| ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ | ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ |
|-------------------|---|
| ΔΥΑΔΙΚΕΣ | |
| YMC | Δυνατότητα συμπαραγωγής |
| YVE(d,h) | Δυνατότητα πώλησης ηλεκτρικού ρεύματος |
| ΑΚΕΡΑΙΕΣ | |
| NMCOPE(d,h) | Αριθμός μονάδων συμπαραγωγής σε λειτουργία |
| T(d,h) | Ετήσιες ώρες λειτουργίες για την h ώρα την d χαρακτηριστική μέρα |
| NABS | Αριθμός ψυκτών απορρόφησης |
| NAUX | Αριθμός λεβήτων |
| NMC | Αριθμός μονάδων συμπαραγωγής σε λειτουργία |
| NMF | Αριθμός ψυκτών συμπίεσης |
| NTR | Αριθμός πύργων ψύξης |
| ΘΕΤΙΚΕΣ | |
| ACUCINS | Ενεργειακή χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας (θερμική ενέργεια, kWh) |
| ACUFINS | Ενεργειακή χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας (ψυκτική ενέργεια, kWh) |
| CE(d,h) | Ωριαίο ενεργειακό κόστος |
| ACUC(d,h) | Αποθηκευμένη θερμότητα (θερμική ενέργεια, kWh) |
| ACUF(d,h) | Αποθηκευμένη θερμότητα (ψυκτική ενέργεια, kWh) |
| CARC(d,h) | Αποθηκευμένη θερμότητα (θερμική ενέργεια, kW) |
| CARF(d,h) | Αποθηκευμένη θερμότητα (ψυκτική ενέργεια, kW) |
| CFIX | Ετήσιο σταθερό κόστος (€ ανά έτος) |
| CVAR | Ετήσιο ενεργειακό κόστος (€ ανά έτος) |
| DESC(d,h) | Ανακτώμενη θερμότητα (θερμική ενέργεια kW) |
| DESF(d,h) | Ανακτώμενη θερμότητα (ψυκτική ενέργεια kW) |
| EC(d,h) | Αγορασμένη ηλεκτρική ενέργεια (kW) |
| EV(d,h) | Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια (kW) |
| FAUX(d,h) | Καύσιμο λέβητα (kW) |
| FM(d,h) | Καύσιμο μονάδων συμπαραγωγής (kW) |
| PERC(d,h) | Απώλειες θερμότητας (θερμική ενέργεια kW) |
| PERF(d,h) | Απώλειες θερμότητας (ψυκτική ενέργεια kW) |
| QABS(d,h) | Θερμότητα προς τους ψύκτες απορρόφησης (kW) |
| QABSD(d,h) | Απώλειες στους ψύκτες απορρόφησης (kW) |
| QAUX(d,h) | Θερμότητα από τους λέβητες (kW) |
| QC(d,h) | Συμπαραγόμενη θερμότητα από τον χιτώνα (kW) |
| QCA(d,h) | Χρησιμοποιούμενη συμπαραγόμενη θερμότητα από τον χιτώνα (kW) |
| QCAT(d,h) | Θερμότητα που παρέχεται στους πελάτες (kW) |
| QCD(d,h) | Απώλειες συμπαραγόμενης θερμότητας από τον χιτώνα (kW) |
| QG(d,h) | Συμπαραγόμενη θερμότητα από τα καυσαέρια (kW) |
| QGA(d,h) | Χρησιμοποιούμενη συμπαραγόμενη θερμότητα από τα καυσαέρια (kW) |
| QGD(d,h) | Απώλειες συμπαραγόμενης θερμότητας από τα καυσαέρια (kW) |
| QMFD(d,h) | Απώλειες θερμότητας στους ψύκτες συμπίεσης (kW) |
| QO(d,h) | Συμπαραγόμενη θερμότητα από τα λιπαντικά λάδια (kW) |
| QOA(d,h) | Χρησιμοποιούμενη συμπαραγόμενη θερμότητα από τα λιπαντικά λάδια (kW) |
| QOD(d,h) | Απώλειες συμπαραγόμενης θερμότητας από τα λιπαντικά λάδια (kW) |
| QREF(d,h) | Θερμότητα που διαχέεται στους πύργους ψύξης (kW) |
| RABS(d,h) | Ψύξη από τους ψύκτες απορρόφησης (kW) |
| RMF(d,h) | Ψύξη από τους ψύκτες συμπίεσης (kW) |
| WM(d,h) | Συμπαραγόμενος ηλεκτρισμός (kW) |
| WMF(d,h) | Παρεχόμενο έργο στους ψύκτες συμπίεσης (kW) |
| ΕΛΕΥΘΕΡΕΣ | |
| CTOT | Ετήσιο κόστος (€) |

Πίνακας 5.9: Λίστα μεταβλητών του μοντέλου σε κατηγορίες.

5.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

5.2.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Στο μοντέλο μας, η αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση είναι η συνάρτηση του συνολικού κόστους ανά έτος της λειτουργίας του συστήματος αυτού. Το συνολικό κόστος όλου του συστήματος αναλύεται στο άθροισμα του σταθερού και του ενεργειακού κόστους.

$$CTOT = CFIX + CVAR \quad (1)$$

Τα σταθερά κόστη αποτελούνται από το σύνολο των εξόδων επένδυσης των διαφόρων μονάδων πολλαπλασιασμένο με τον συντελεστή απόσβεσης fam :

$$CFIX = fam \cdot [imc \cdot NMC + iaux \cdot NAUX + imf \cdot NMF + iabs \cdot NABS + itr \cdot NTR + iuc \cdot ACUCINS + iuf \cdot ACUFINS] \quad (2)$$

Ο συντελεστής απόσβεσης fam αποτελείται από τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος (fmo) και από τον ετήσιο συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου (fcr):

$$fam = fmo + fcr \quad (3)$$

Τα ετήσια έξοδα συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος (εκτός του κόστους ενέργειας) θεωρήθηκαν ίσα με το 2% του συνολικού κόστους του συστήματος. Ο συντελεστής απόσβεσης fcr θεωρήθηκε ίσος με 8% το οποίο αντιστοιχεί σε χρόνο ζωής του συστήματος ίσο με 20 χρόνια και ετήσιο επιτόκιο ίσο με 5%. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ότι το fam είναι ίσο με 10%.

Τα ενεργειακά κόστη αποτελούνται από το πολλαπλασιασμό του ωριαίου ενεργειακού κόστους με τον ακριβή αριθμό των ημερών κάθε μήνα. Αν σε κάθε μήνα αντιστοιχεί μία τυπική μέρα τότε συνολικά έχουμε 12 τυπικές μέρες (d). Η κάθε τυπική μέρα αποτελείται από 24 ώρες (h). Επομένως αν πολλαπλασιάσουμε ξεχωριστά το κάθε ωριαίο ενεργειακό κόστος ($CE(d,h)$) με τον αριθμό των ημερών ενός συγκεκριμένου μήνα ($ND(d)$) και στο τέλος τα αθροίσουμε, προκύπτει η μηνιαία ενεργειακή κατανάλωση για τον συγκεκριμένο μήνα. Αν κάνουμε την ίδια διαδικασία για όλους τους μήνες τότε προκύπτει η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση που περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Cvar = \sum_d \sum_h CE(d,h) \cdot ND(d) \quad (4)$$

Το ωριαίο ενεργειακό κόστος προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$CE(d,h) = cf \cdot [FM(d,h) + FAUX(d,h)] + cqref \cdot QREF(d,h) + cec(h) \cdot EC(d,h) - cenc \cdot EV(d,h) \quad (5)$$

όπου:

- ο όρος " $cf \cdot [FM(d,h) + FAUX(d,h)]$ " εκφράζει το ωριαίο κόστος λόγω της προμήθειας του φυσικού αερίου.
- ο όρος " $cqref \cdot QREF(d,h)$ " εκφράζει το ωριαίο κόστος λόγω της εκπομπής θερμότητας από τους πύργους ψύξης.
- ο όρος " $cec(h) \cdot EC(d,h)$ " εκφράζει το ωριαίο κόστος λόγω της προμήθειας ηλεκτρικού ρεύματος.
- ο όρος " $cenc \cdot EV(d,h)$ " εκφράζει την μείωση του ωριαίου κόστους λόγω της πώλησης ηλεκτρικού ρεύματος.

5.2.2 Όρια χωρητικότητας, περιορισμοί της παραγωγής, εξισώσεις ισορροπίας

Όλες οι εξισώσεις είναι ωριαίες δηλαδή είναι συνάρτηση των ωρών (h) και των τυπικών ημερών (d).

Μονάδες Συμπαγωγής

Η ηλεκτρική ενέργεια προς πώληση [$WM(d,h)$] οφείλει να είναι μικρότερη ή ίση με το γινόμενο του αριθμού των μονάδων συμπαγωγής με την ονομαστική ισχύ τους:

$$WM(d,h) \leq Nmc \cdot wmnom \quad (6)$$

Τα ενεργειακά ρεύματα εισόδου [ενέργεια φυσικού αερίου ($FM(d,h)$)] και εξόδου [ενέργεια καυσαερίων $QG(d,h)$, χιτώνια $QC(d,h)$ και λιπαντικών λαδιών $QC(d,h)$] εκφράζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$FM(d,h) = rfw \cdot WM(d,h) \quad (7)$$

$$QG(d,h) = rkg \cdot WM(d,h) \quad (8)$$

$$QC(d,h) = rkc \cdot WM(d,h) \quad (9)$$

$$QO(d,h) = rko \cdot WM(d,h) \quad (10)$$

Λέβητες

Η ενεργειακή χωρητικότητα των λεβήτων [QAUX(d,h)] πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση του γινομένου του αριθμού των λεβήτων (NAUX) με την ονομαστική ισχύ τους (qauxnom):

$$QAUX(d,h) \leq NAUX \cdot qauxnom \quad (11)$$

Το ενεργειακό ρεύμα εισόδου στους λέβητες είναι ίσο με τον λόγο της ενεργειακής χωρητικότητας τους ως προς την απόδοσή τους (r_{qf}):

$$FAUX(d,h) = QAUX/r_{qf} \quad (12)$$

Ψύκτες συμπίεσης

Η ενεργειακή χωρητικότητα των ψυκτών συμπίεσης [RMF(d,h)] πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση του γινομένου του αριθμού των ψυκτών συμπίεσης (NMF) με την ονομαστική ισχύ τους (rmfnom):

$$RMF(d,h) \leq NMF \cdot rmfnom \quad (13)$$

Το ενεργειακό ρεύμα εισόδου στους ψύκτες συμπίεσης [WMF(d,h)] είναι ίσο με τον λόγο του ενεργειακού ρεύματος εξόδου ως προς τον συντελεστή απόδοσης τους (c_{ormf}):

$$WMF(d,h) = RMF(d,h)/c_{ormf} \quad (14)$$

Ψύκτες απορρόφησης

Η ενεργειακή χωρητικότητα των ψυκτών συμπίεσης [RABS(d,h)] πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση του γινομένου του αριθμού των ψυκτών συμπίεσης (NABS) με την ονομαστική ισχύ τους (rabsnom):

$$RABS(d,h) \leq NABS \cdot rabsnom \quad (15)$$

Το ενεργειακό ρεύμα εισόδου στους ψύκτες συμπίεσης [QABS(d,h)] είναι ίσο με τον λόγο του ενεργειακού ρεύματος εξόδου ως προς τον συντελεστή απόδοσης τους (c_{opabs}):

$$QABS(d,h) = RABS(d,h)/c_{opabs} \quad (16)$$

Πύργοι ψύξης

Η απορριπτόμενη θερμότητα από τους πύργους ψύξης [QREF(d,h)] είναι ίση το γινόμενο του αριθμού των πύργων ψύξης (NTR) με την ονομαστική ισχύ τους (qrefnom):

$$QREF(d,h) = NTR \cdot qrefnom \quad (17)$$

Ισοζύγια ενέργειας

Τα ισοζύγια ενέργειας που εκφράζουν τις απώλειες θερμότητας στις μονάδες συμπαραγωγής (στα ρεύματα των καυσαερίων, του χιτώνα και των λιπαντικών λαδιών) εκφράζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$QG(d,h) = QGD(d,h) + QGA(d,h) \quad (18)$$

$$QC(d,h) = QCD(d,h) + QCA(d,h) \quad (19)$$

$$QO(d,h) = QOD(d,h) + QOA(d,h) \quad (20)$$

Τα ισοζύγια ενέργειας για τους ψύκτες συμπίεσης, τους ψύκτες απορρόφησης και την ενέργεια που εξέρχεται από τους λέβητες, εκφράζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$QMFD(d,h) = WMF(d,h) - RMF(d,h) \quad (21)$$

$$ABSD(d,h) = QABS(d,h) - RABS(d,h) \quad (22)$$

$$QGA(d,h) + QCA(d,h) + QAUX(d,h) = QABS(d,h) + QCAT(d,h) \quad (23)$$

Το ισοζύγιο ενέργειας για την θερμότητα προς αποθήκευση [DESC(d,h)] εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$QCAT(d,h) + QOA(d,h) + DESC(d,h) = CARC(d,h) + DQ(h,d) + DSHW(h,d) \quad (24)$$

Το ισοζύγιο ενέργειας για την ψύξη προς αποθήκευση [DESF(d,h)] εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$RMF(d,h) + RABS(d,h) + DESF(d,h) = CARF(d,h) + DF(h,d) \quad (25)$$

Το ισοζύγιο ενέργειας στους πύργους ψύξης είναι το παρακάτω:

$$QCD(d,h) + QOD(d,h) + QMFD(d,h) + QABSD(d,h) = QREF(d,h) \quad (26)$$

Το ισοζύγιο ενέργειας για την πώληση [EV(d,h)] και αγορά [EC(d,h)] του ηλεκτρικού ρεύματος είναι το παρακάτω:

$$EC(d,h) + WM(d,h) = EV(d,h) + WMF(d,h) \quad (27)$$

Αποθήκευση θερμότητας

Η αποθηκευόμενη θερμότητα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση της ενεργειακής χωρητικότητας της δεξαμενής:

$$ACUC(d,h) \leq ACUCINS \quad (28)$$

Οι ενεργειακές απώλειες της αποθηκευμένης θερμότητας [PERC(d,h)] είναι ίσες με το γινόμενο του συντελεστή απωλειών θερμότητας (fperc) με την αποθηκευόμενη θερμότητα [ACUC(d,h)]:

$$\text{PERC}(d,h) = \text{fperc} \cdot \text{ACUC}(d,h) \quad (29)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις συνέχειας της αποθηκευμένης θερμότητας [PERC(d,h)]:

$$\text{ACUC}(d,1) - \text{ACUC}(d,24) = [\text{CARC}(d,h) - \text{DESC}(d,h) - \text{PERC}(d,h)] \text{ για } h = 1 \quad (30)$$

$$\text{ACUC}(d,h) - \text{ACUC}(d,h-1) = [\text{CARC}(d,h) - \text{DESC}(d,h) - \text{PERC}(d,h)] \text{ για } h > 1 \quad (31)$$

Αποθήκευση ψύξης

Η αποθηκευόμενη ψύξη πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση της ενεργειακής χωρητικότητας της δεξαμενής:

$$\text{ACUF}(d,h) \leq \text{ACUflns} \quad (32)$$

Οι ενεργειακές απώλειες της αποθηκευμένης θερμότητας [PERF(d,h)] είναι ίσες με το γινόμενο του συντελεστή απωλειών θερμότητας (fperf) με την αποθηκευόμενη θερμότητα [ACUF(d,h)]:

$$\text{PERF}(d,h) = \text{fperf} \cdot \text{ACUF}(d,h) \quad (33)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις συνέχειας της αποθηκευμένης θερμότητας [PERF(d,h)]:

$$\text{ACUF}(d,h) - \text{ACUF}(d,24) = [\text{CARF}(d,h) - \text{DESF}(d,h) - \text{PERF}(d,h)] \text{ για } h=1 \quad (34)$$

$$\text{ACUF}(d,h) - \text{ACUF}(d,h-1) = [\text{CARF}(d,h) - \text{DESF}(d,h) - \text{PERF}(d,h)] \text{ για } h>1 \quad (35)$$

Δυνατότητα αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας

Το ενεργειακό ποσό που προκύπτει από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας [EV(d,h)] είναι μηδενικό (μιας και το ποσό αυτό αναγκαστικά είναι πάντα θετικό) σε περίπτωση που δεν υπάρχει η δυνατότητα πώλησης [YVE(d,h) = 0] και είναι ίσο με οποιοδήποτε άλλο νούμερο [το οποίο είναι μικρότερο ή ίσο από έναν πολύ μεγάλο αριθμό (rbig)] στην περίπτωση που υπάρχει η δυνατότητα πώλησης [YVE(d,h) = 1]:

$$\text{EV}(d,h) \leq \text{YVE}(d,h) \cdot \text{rbig} \quad (36)$$

Αντίστοιχα, το ενεργειακό ποσό που προκύπτει από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας [EV(d,h)] είναι μηδενικό (μιας και το ποσό αυτό αναγκαστικά είναι πάντα θετικό) σε περίπτωση που υπάρχει η δυνατότητα πώλησης [YVE(d,h) = 1] και είναι ίσο με οποιοδήποτε άλλο νούμερο [το οποίο είναι μικρότερο ή ίσο από έναν πολύ μεγάλο

αριθμό (r_{big}) στην περίπτωση που δεν υπάρχει η δυνατότητα πώλησης [$YVE(d,h) = 0$]:

$$EC(d,h) \leq [1 - YVE(d,h)] \cdot r_{big} \quad (37)$$

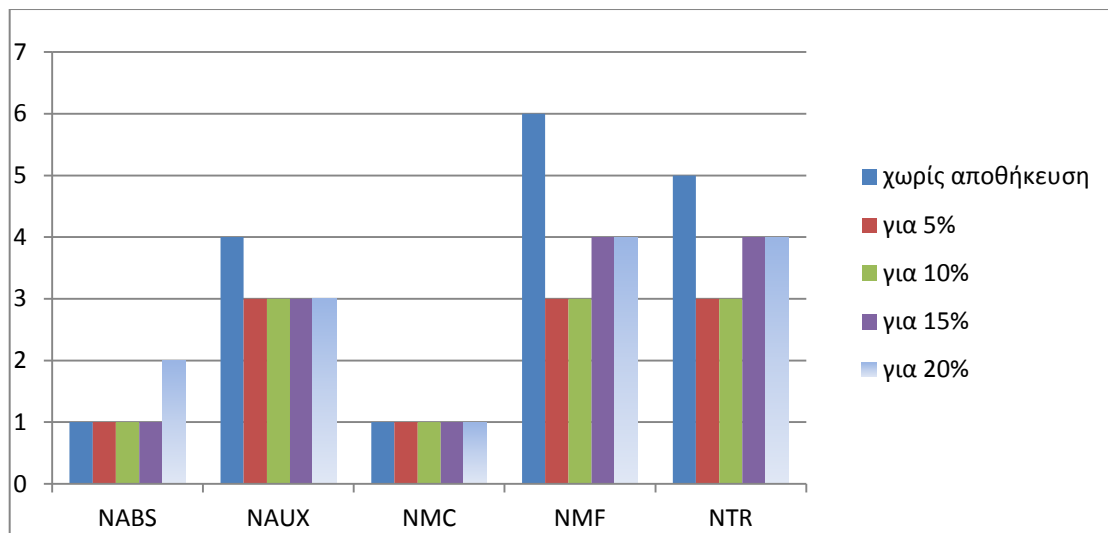
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 ΧΡΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Αφού έγινε η κατάστρωση των εξισώσεων, των μεταβλητών, των παραμέτρων και των δεδομένων του μοντέλου, έγινε η εισαγωγή τους στην πλατφόρμα GAMS. Το GAMS ανέλαβε την βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης χρησιμοποιώντας έναν επιλυτή (solver) ο οποίος χρησιμοποίησε την μέθοδο SIMPLEX.

Συνολικά έγιναν 5 βελτιστοποιήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης: Μία επίλυση για την περίπτωση όπου το σύστημα δεν έχει την δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας και 4 επιλύσεις για διάφορους συντελεστές απωλειών της θερμικής αποθήκευσης (5%, 10%, 15% και 20%). Ο λόγος για τον οποίο έγινε αυτό είναι για να γίνει δυνατή η σύγκριση μεταξύ 5 ιδιαίτερα πιθανών σεναρίων (τα οποία αντιστοιχούν στις 5 βελτιστοποιήσεις) για το σύστημα αυτό.

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται οι τιμές που λαμβάνουν οι μεταβλητές NABS, NAUX, NMC, NMF και NTR για τα 5 πιθανά σενάρια:

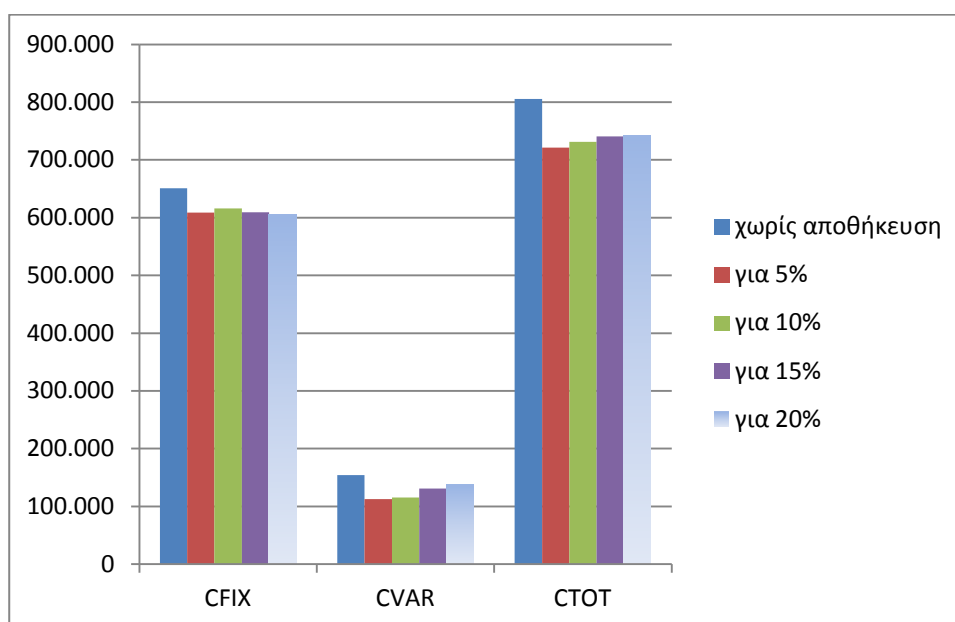


Σχήμα 6.1: Τιμές μεταβλητών απόφασης για 5 πιθανά σενάρια του συστήματος.

Όπως παρατηρούμε στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο ίσες ή περισσότερες μονάδες που εξυπηρετούν το σύστημα (μονάδες συμπαραγωγής, βοηθητικοί λέβητες, ψύκτες συμπίεσης, ψύκτες απορρόφησης και πύργοι ψύξης) σε αντίθεση με τις περιπτώσεις όπου υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας. Επίσης όσο αυξάνεται ο συντελεστής απωλειών στην περίπτωση όπου υπάρχει η

δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας, παρατηρείται σταθεροποίηση ή και αύξηση του αριθμού των μονάδων του συστήματος. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα καθώς σε περίπτωση που δεν υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας, το σύστημα πρέπει να έχει μεγάλη δυναμικότητα για να εξυπηρετήσει τυχόν μεγάλη ζήτηση σε ενεργειακά φορτία, άρα και περισσότερες μονάδες. Στην περίπτωση ύπαρξης αποθήκευσης θερμότητας, η τυχόν μεγάλη ζήτηση σε ενεργειακά φορτία εξυπηρετείται από την ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη και συνεπώς ο αριθμός των μονάδων του συστήματος μπορεί να είναι ίσος ή μικρότερος σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Επίσης όσο αυξάνεται ο συντελεστής απωλειών, η αποθηκευμένη ενέργεια χάνεται και χρειάζονται όλο και περισσότερες μονάδες για την αντιμετώπιση τυχόν μεγάλης ενεργειακής ζήτησης.

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται: το σταθερό κόστος (CFIX), το ενεργειακό κόστος (CVAR) και το συνολικό κόστος (CTOT) του συστήματος για τα 5 πιθανά σενάρια.

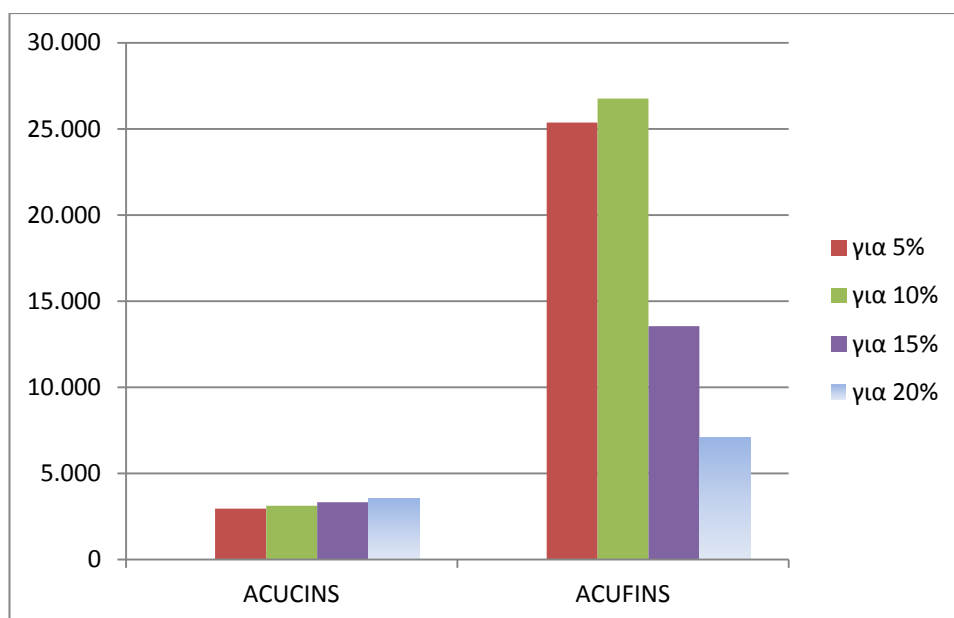


Σχήμα 6.2: Τιμές μεταβλητών σταθερού, μεταβλητού και συνολικού κόστους (€) για 5 πιθανά σενάρια του συστήματος.

Παρατηρούμε πως στην περίπτωση μη ύπαρξης της δυνατότητας αποθήκευσης θερμότητας όλα τα κόστη είναι μεγαλύτερα από την περίπτωση της ύπαρξης. Επίσης όσο αυξάνεται ο συντελεστής απωλειών τόσο αυξάνεται το λειτουργικό και το συνολικό κόστος του συστήματος. Παρ' όλα αυτά, με την αύξηση του συντελεστή απωλειών το σταθερό κόστος παραμένει περίπου ίδιο. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα καθώς στην περίπτωση μη ύπαρξης της δυνατότητας αποθήκευσης θερμότητας, ο αριθμός των μονάδων του συστήματος είναι μεγαλύτερος, άρα και το συνολικό κόστος είναι μεγαλύτερο. Ακόμα, το συνολικό κόστος αυξάνεται με την αύξηση του συντελεστή απωλειών λόγω της ανάγκης ύπαρξης περισσότερων μονάδων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η ύπαρξη περισσότερων μονάδων

αυξάνει το σταθερό κόστος του συστήματος, το οποίο όμως αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού κόστους και άρα είναι καθοριστικό γι' αυτό. Συγκεκριμένα, το συνολικό κόστος στην περίπτωση χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας βρέθηκε ίσο με 805.414 €. Στην περίπτωση με δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας βρέθηκε ίσο με 721.147 € για το σενάριο με συντελεστή απωλειών ίσο με 5%. Άρα επιτυγχάνεται εξοικονόμηση της τάξης του 10,5% η οποία για τα υπόλοιπα σενάρια κυμαίνεται έως και το 7,8%. Αυτό οφείλεται στην διαδρομή του ενεργειακού κόστους το οποίο στην περίπτωση χωρίς αποθήκευση είναι ίσο με 154.454 €. Με την δυνατότητα αποθήκευσης το κόστος αυτό κυμαίνεται από 112.498 € έως 137.096 €, δηλαδή επιτυγχάνεται εξοικονόμηση από 11,2% έως 27%. Επίσης το σταθερό κόστος επηρεάζει κι αυτό το συνολικό κόστος μιας και μειώνεται. Στην περίπτωση χωρίς αποθήκευση βρέθηκε ίσο με 650.960 € και στην περίπτωση με αποθήκευση κυμαίνεται από 605.477 € έως 615.857€ δηλαδή επιτυγχάνεται εξοικονόμηση από 5,4% έως 7%. Επειδή τα παραπάνω κόστη αναφέρονται σε ετήσια βάση παρατηρούμε πως μια υποθετική επένδυση στην δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας στην περίπτωση αυτή, αποσβένει σε λιγότερο από ένα έτος μιας και τελικά το συνολικό κόστος είναι μικρότερο και για τα 4 υποθετικά σενάρια (5%, 10%, 15% και 20%). Το γεγονός αυτό κάνει την αποθήκευση θερμότητας μια αρκετά ελκυστική επιλογή για την εξοικονόμηση κόστους σε ένα τέτοιο σύστημα.

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζονται οι ενεργειακές χωρητικότητες των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (ACUCINS) και ψυκτικής ενέργειας (ACUFINS).

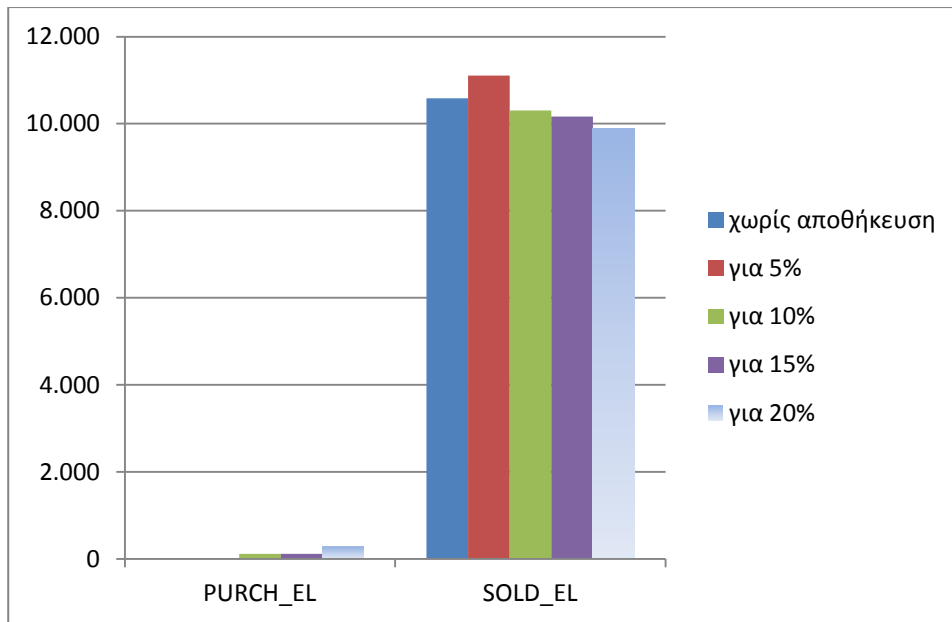


Σχήμα 6.3: Χωρητικότητες των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας (kWh) για 4 πιθανά σενάρια του συστήματος.

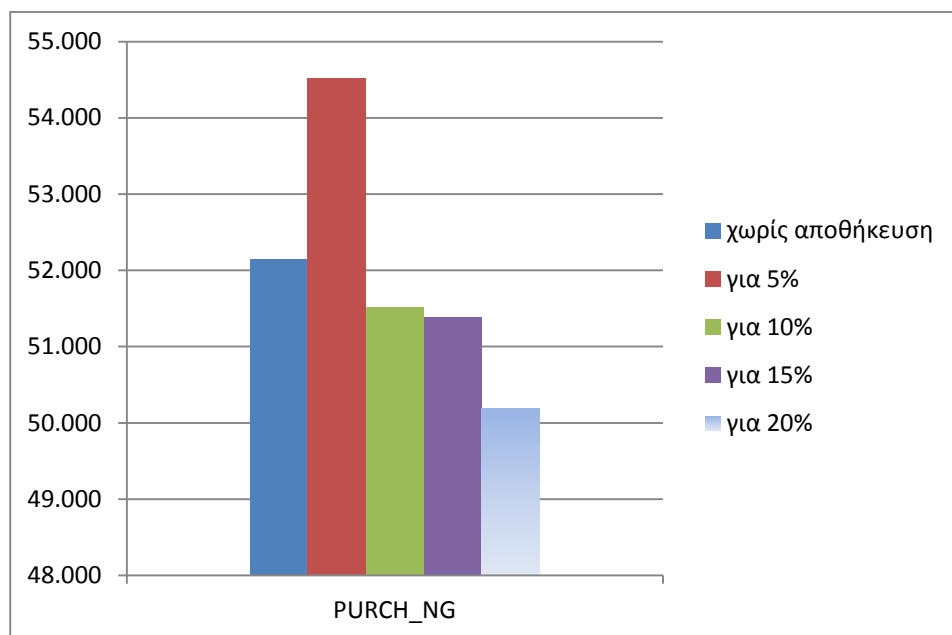
Όπως παρατηρούμε, όσο αυξάνεται ο συντελεστής θερμικών απωλειών, έχουμε και σταδιακή αύξηση της χωρητικότητας αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι οι μονάδες παραγωγής θερμότητας είναι ίδιες και στα 4 σενάρια αυτά κι επομένως η αύξηση της χωρητικότητας ισοσταθμίζει τις απώλειες. Το αντίστοιχο ισχύει και για την αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας με εξαίρεση τα σενάρια για τα οποία ο συντελεστής θερμικών απωλειών είναι ίσος με 15% και 20% και όπου η χωρητικότητα αποθήκευσης μειώνεται. Σε αυτές τις περιπτώσεις έχουμε περισσότερες μονάδες ψύξης, δηλαδή μεγαλύτερη δυναμικότητα με την οποία συνεπάγεται μικρότερη ανάγκη σε χωρητικότητα αποθήκευσης.

Στο Σχήμα 6.4 και στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζονται οι τιμές των ποσών για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (PURCH_EL), την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας (SOLD_EL) καθώς και την κατανάλωση φυσικού αερίου (PURCH_NG). Όλα τα ποσά εκφράζονται σε MW. Για την πλήρη κατανόηση των τιμών αυτών, τα διαγράμματα αυτά οφείλονται να εξεταστούν παράλληλα.

Παρατηρούμε πώς η ύπαρξη της αποθήκευσης θερμότητας μειώνει την ανάγκη αγοράς του φυσικού αερίου. Αυτό συμβαίνει διότι γίνεται λιγότερη χρήση των μονάδων συμπαραγωγής και των βοηθητικών λεβήτων για την παραγωγή θερμότητας μιας και σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται η ήδη αποθηκευμένη. Η κατανάλωση φυσικού αερίου μειώνεται με την αύξηση του συντελεστή απωλειών θερμότητας μιας και θεωρείται περισσότερο συμφέρουσα η αγορά ηλεκτρικού ρεύματος η οποία και αυξάνεται σταδιακά. Επίσης η πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται όσο αυξάνεται ο συντελεστής απωλειών κάτι το αναμενόμενο μιας και όπως αναφέρθηκε παραπάνω η αύξηση του συντελεστή απωλειών μειώνει την ανάγκη αγοράς φυσικού αερίου. Συνεπώς οι ενεργειακές ανάγκες πρέπει να καλυφθούν με την χρήση ηλεκτρικού ρεύματος και έτσι στενεύουν τα περιθώρια πώλησής του. Εξαίρεση στον κανόνα αποτελεί η περίπτωση με συντελεστή απωλειών ίσο με 5% στην οποία παρατηρούνται αυξημένες ποσότητες κατανάλωσης φυσικού αερίου οι οποίες όμως δικαιολογούνται από την ελάχιστη ποσότητα αγοράς ηλεκτρικού ρεύματος και την μεγάλη ποσότητα πώλησής του. Κάτι τέτοιο μαρτυρά πως σε αυτή την περίπτωση, η ικανοποίηση των αναγκών ψύξης από οικονομική άποψη κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιείται κυρίως με τους ψύκτες απορρόφησης, οι οποίοι χρησιμοποιούν θερμότητα (υπάρχει μεγαλύτερο ποσό αποθηκευμένης θερμότητας στο σύστημα λόγω του μικρού συντελεστή απωλειών), ενώ αντιθέτως γίνεται πολύ μικρή χρήση των ψυκτών συμπίεσης οι οποίοι καταναλώνουν ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 6.4: Αγορά και πώληση ηλεκτρικού ρεύματος (MWh/yr) για 5 πιθανά σενάρια του συστήματος.



Σχήμα 6.5: Κατανάλωση φυσικού αερίου (MWh/yr) για 5 πιθανά σενάρια του συστήματος.

Τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων του συστήματος που αναφέρθηκαν και παραπάνω, παρουσιάζονται αναλυτικότερα στον Πίνακα 6.1. Στον πίνακα αυτό βλέπουμε τις ακριβείς τιμές που λαμβάνουν οι διάφορες μεταβλητές ώστε το σύστημα να έχει την βέλτιστη λειτουργία, για το κάθε πιθανό σενάριο ξεχωριστά.

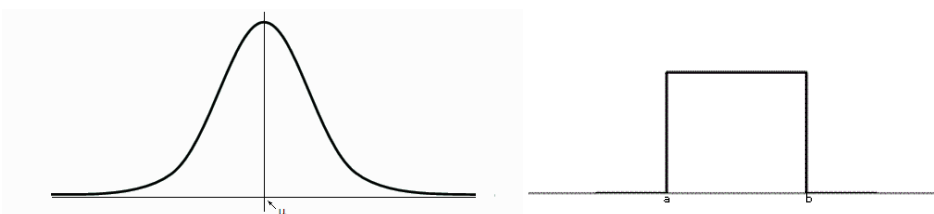
| | ΠΙΘΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΑ | | | | |
|------------------------------|--|--|----------|----------|----------|
| | Χωρίς αποθήκευση θερμότητας | Αποθήκευση Θερμότητας με συντελεστή απωλειών | | | |
| | | 5% | 10% | 15% | 20% |
| Μονάδες συστήματος | Αριθμός μονάδων / χωρητικότητα (kW) | | | | |
| Μονάδα συμπαραγωγής | 1/2.928 | 1/2.928 | 1/2.928 | 1/2.928 | 1/2.928 |
| Βοηθητικοί λέβητες | 4/16.280 | 3/12.210 | 3/12.210 | 3/12.210 | 3/12.210 |
| Ψύκτες συμπίεσης | 6/25.320 | 3/12.660 | 3/12.660 | 4/16.880 | 4/16.880 |
| Ψύκτες απορρόφησης | 1/2.112 | 1/2.112 | 1/2.112 | 1/2.112 | 2/4.224 |
| Πύργοι ψύξης | 5/40.000 | 3/24.000 | 3/24.000 | 4/32.000 | 4/32.000 |
| Αποθήκευση Θερμότητας | Χωρητικότητα (kWh) | | | | |
| Θερμική ενέργεια | - | 2944,5 | 3126,6 | 3321,5 | 3530 |
| Ψυκτική ενέργεια | - | 25357 | 26760 | 13546,2 | 7087,4 |
| Φυσικό Αέριο | Ενεργειακό ποσό (MWh/yr) | | | | |
| Κατανάλωση φυσικού αερίου | 52.149 | 54.514 | 51.520 | 51.387 | 50.182 |
| Ηλεκτρική ενέργεια | Ενεργειακό ποσό (MWh/yr) | | | | |
| Αγορά ηλεκτρικής ενέργειας | 21 | 23 | 118 | 115 | 276 |
| Πώληση ηλεκτρικής ενέργειας | 10.588 | 11.107 | 10.307 | 10.166 | 9.886 |
| Κόστη | Ποσά ανά έτος (€) | | | | |
| Σταθερό κόστος | 650.960 | 608.649 | 615.857 | 609.538 | 605.477 |
| Ενεργειακό κόστος | 154.454 | 112.498 | 115.628 | 131.107 | 137.096 |
| Συνολικό κόστος | 805.414 | 721.147 | 731.486 | 740.645 | 742.573 |

Πίνακας 6.1: Αναλυτική παρουσίαση των τιμών διαφόρων μεταβλητών του συστήματος για την βέλτιστη λειτουργία του.

6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE CARLO

Στο συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε να γίνει ανάλυση ευαισθησίας ώστε να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά που έχει η μεταβλητή CTOT η οποία αποτελεί και την αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ως πιο πιθανό σενάριο αυτό που έχει συντελεστή θερμικών απωλειών ίσο με 10%. Έχοντας ως βάση αυτό το σενάριο, κρίθηκαν κάποιες παράμετροι του μοντέλου ως αβέβαιες, δηλαδή ως παράμετροι οι οποίες είναι πολύ πιθανό να λάβουν κάποια στιγμή διαφορετική τιμή. Αυτές είναι η τιμή του φυσικού αερίου (cf), η τιμή αγοράς του ηλεκτρικού ρεύματος για τρεις ξεχωριστές τιμολογήσεις (ceoff, cenormal, cereak) καθώς και η τιμή πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος (cenc).

Για την ανάλυση ευαισθησίας επιλέχθηκε η μέθοδος Monte Carlo η οποία αποτελεί μια κλασική και αξιόπιστη μέθοδο για τον σκοπό αυτό. Για μεγαλύτερη ακρίβεια ο αριθμός των επαναλήψεων της μεθόδου τέθηκε ίσος με 1000. Επίσης, έγιναν συνολικά δύο προσομοιώσεις. Στην πρώτη προσομοίωση η τυχαία δειγματοληψία των αβέβαιων παραμέτρων θεωρήθηκε ότι ακολουθεί κανονική κατανομή (Σχήμα 6.6α) ενώ στην δεύτερη θεωρήθηκε ότι ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (Σχήμα 6.6β).



Σχήμα 6.6: α) Κανονική κατανομή (αριστερά), β) Ομοιόμορφη κατανομή (δεξιά)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte Carlo και για τα δύο είδη κατανομών. Σε αυτά εκτός από την συμπεριφορά της μεταβλητής CTOT η οποία είναι και αυτή που μας ενδιαφέρει κυρίως, κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί και η συμπεριφορά διάφορων άλλων μεταβλητών από τις οποίες η ίδια εξαρτάται, προκειμένου να γίνει μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση της ευαισθησίας του μοντέλου αυτού. Αυτές οι μεταβλητές είναι οι: NABS, NAUX, NMC, NMF, NTR, CFIX, CVAR, CTOT, ACUCINS, ACUFINS, PURCH_EL, SOLD_EL και PURCH_NG.

Αρχικά βλέπουμε στον Πίνακα 6.2 τις τιμές που λαμβάνουν οι μεταβλητές NABS, NAUX, NMC, NMF και NTR για κάθε μία από τις 1000 επαναλήψεις της μεθόδου.

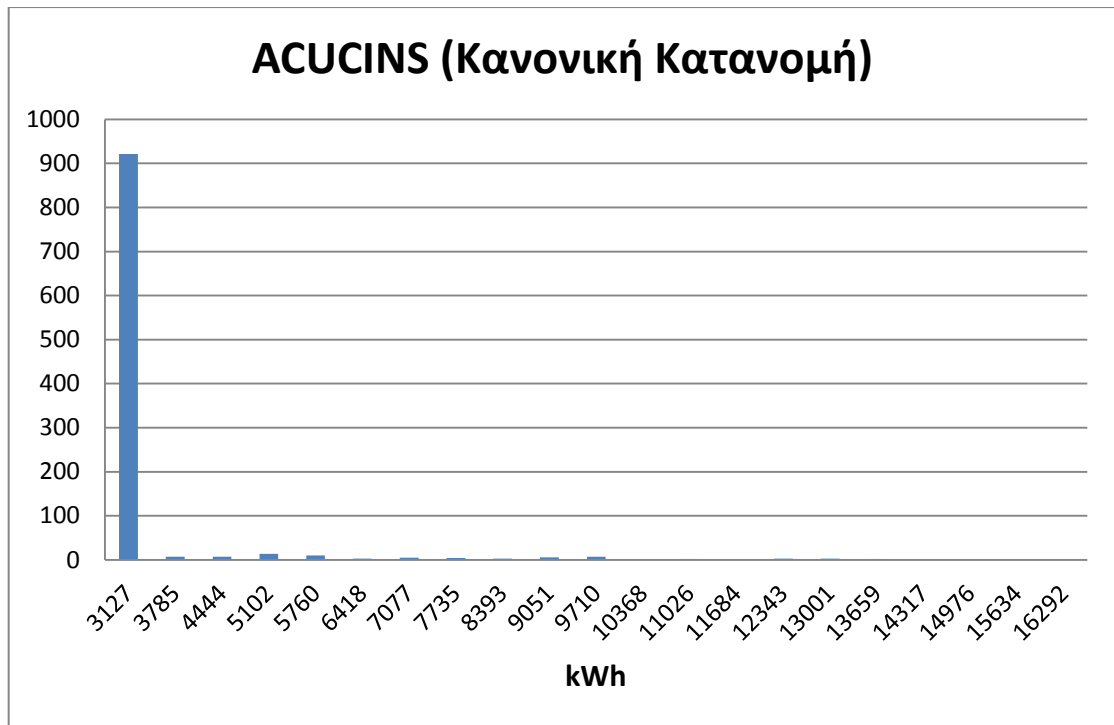
| Αριθμός μονάδων | Κανονική Κατανομή | | | | | Ομοιόμορφη Κατανομή | | | | |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|---------------------|------|-----|-----|-----|
| | NABS | NAUX | NMC | NMF | NTR | NABS | NAUX | NMC | NMF | NTR |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1000 | 0 | 1000 | 0 | 0 | 943 | 0 | 950 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 50 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1000 | 0 | 1000 | 1000 | 0 | 950 | 0 | 910 | 947 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 | 53 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Πίνακας 6.2: Τιμές των μεταβλητών NABS, NAUX, NMC, NMF και NTR για κάθε επανάληψη.

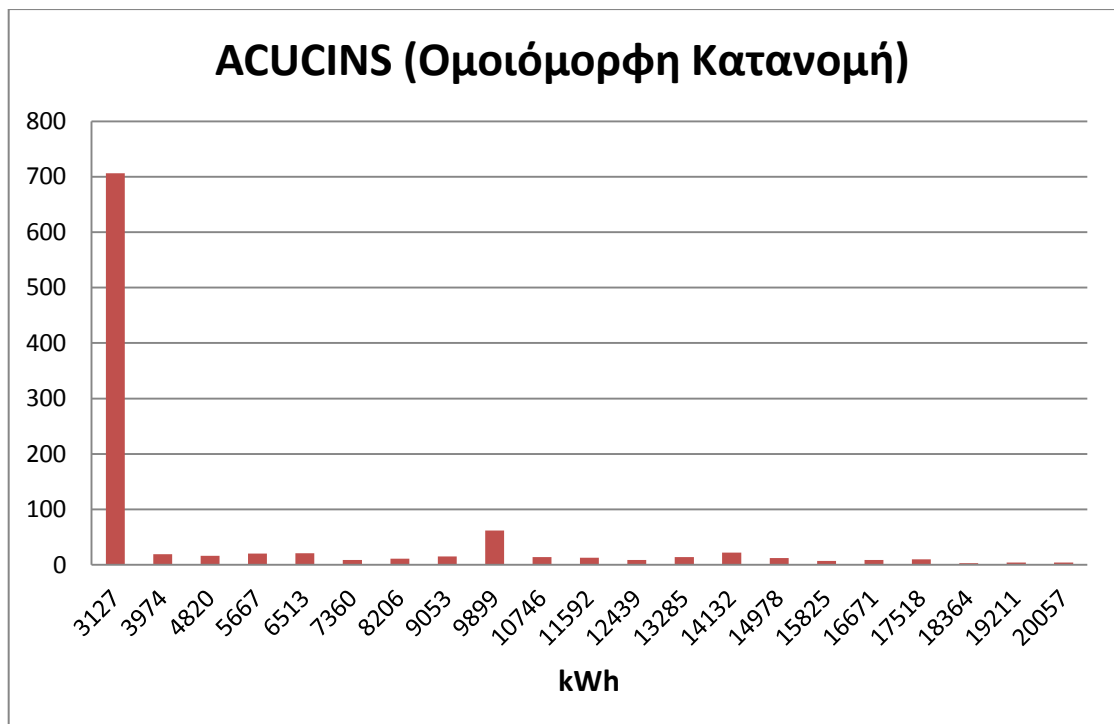
Παρατηρούμε πως στην περίπτωση όπου οι τυχαίες τιμές των αβέβαιων παραμέτρων ακολουθούν κανονική κατανομή δεν έχουμε καμία απολύτως διασπορά στις τιμές που λαμβάνουν οι μεταβλητές των διάφορων μονάδων και συνεπώς καμία απολύτως αβεβαιότητα για τον αριθμό τους. Στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής έχουμε μία πολύ μικρή διασπορά καθώς περίπου πάνω από το 90% των επαναλήψεων συγκλίνει σε μία συγκεκριμένη τιμή. Η μικρή αυτή διασπορά δικαιολογείται καθώς η ομοιόμορφη κατανομή είναι πιο σπάνια για το είδος των αβέβαιων παραμέτρων αυτών και θεωρείται ότι εμπεριέχει περισσότερη αβεβαιότητα από την κανονική.

Στην συνέχεια έχουμε τις τιμές που λαμβάνουν οι μεταβλητές που έχουν σχέση με τις χωρητικότητες αποθήκευσης δηλαδή η αποθήκευση θερμικής ενέργειας (ACUCINS) και η αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας (ACUFINS) όπως φαίνεται και στα Σχήματα 6.7, 6.8, 6.9 και 6.10.

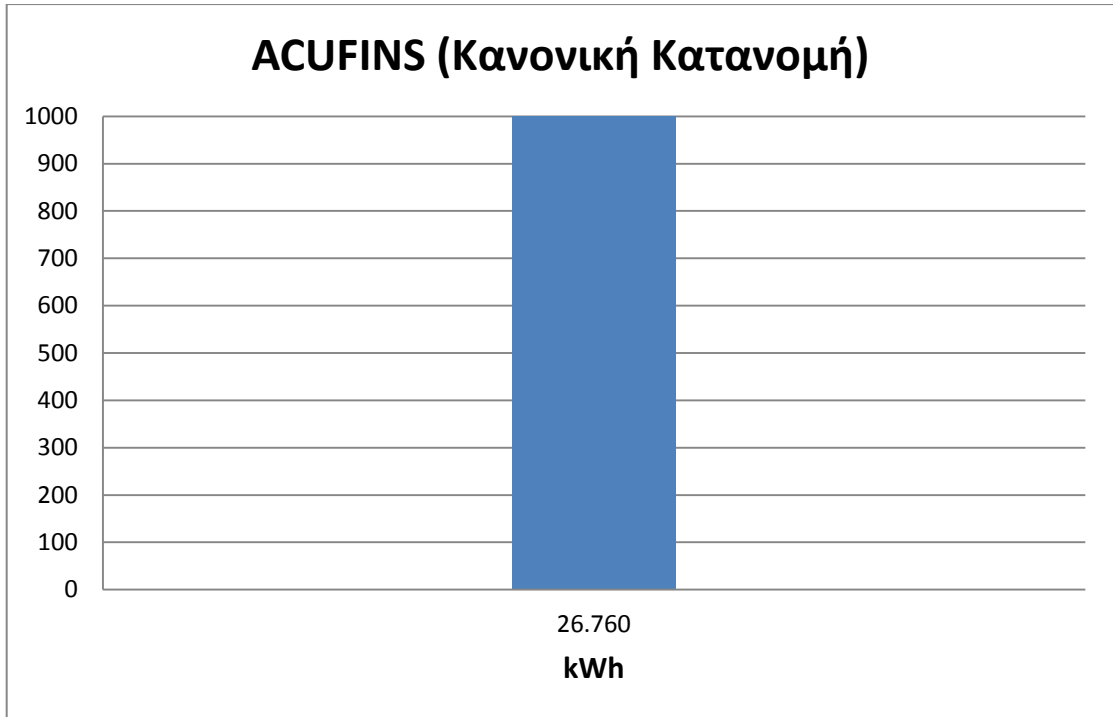
Όπως παρατηρούμε και για τις δύο αυτές μεταβλητές, η πλειοψηφία των επαναλήψεων αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη τιμή για την περίπτωση της κανονικής και της ομοιόμορφης κατανομής, κάτι το οποίο μαρτυρά ελάχιστη έως καθόλου αβεβαιότητα για την περίπτωση αυτή.



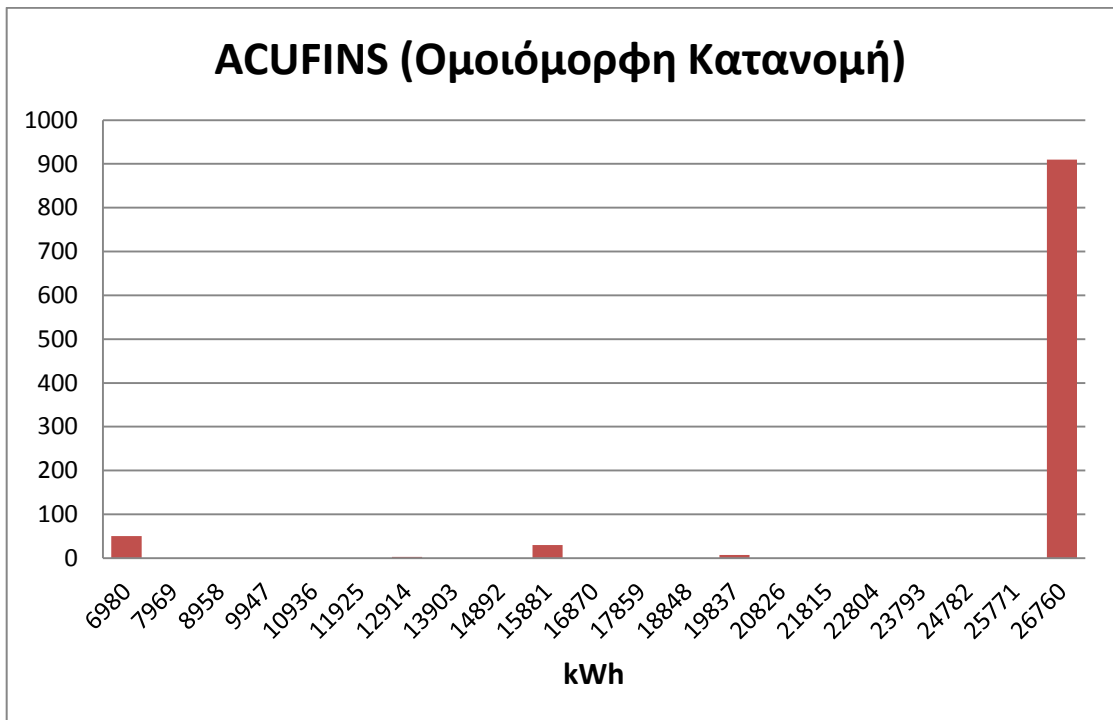
Σχήμα 6.7: Τιμές της χωρητικότητας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (ACUCINS) για κανονική κατανομή.



Σχήμα 6.8: Τιμές της χωρητικότητας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (ACUCINS) για ομοιόμορφη κατανομή.

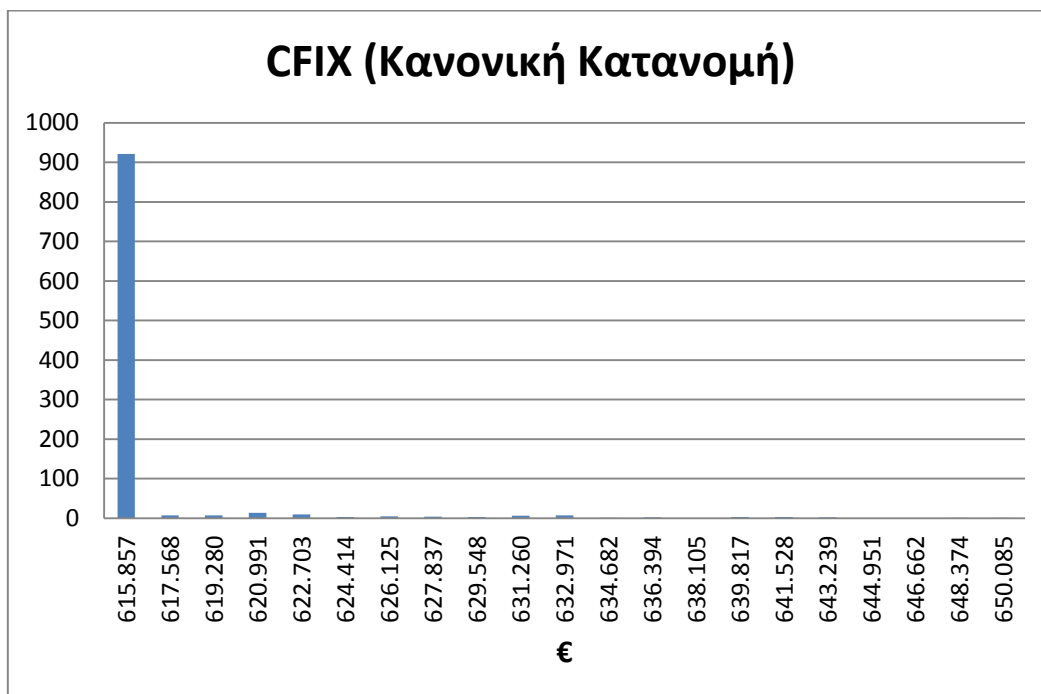


Σχήμα 6.9: Τιμή χωρητικότητας αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας (ACUFINS) για κανονική κατανομή.



Σχήμα 6.10: Τιμές χωρητικότητας αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας (ACUFINS) για κανονική κατανομή.

Οι μεταβλητές σχετικές με το κόστος όπως το συνολικό κόστος (CTOT) που είναι και αυτό που μας ενδιαφέρει μιας και αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου, καθώς επίσης το ενεργειακό κόστος (CVAR) και το σταθερό κόστος (CFIX) παρουσιάζονται παρακάτω:

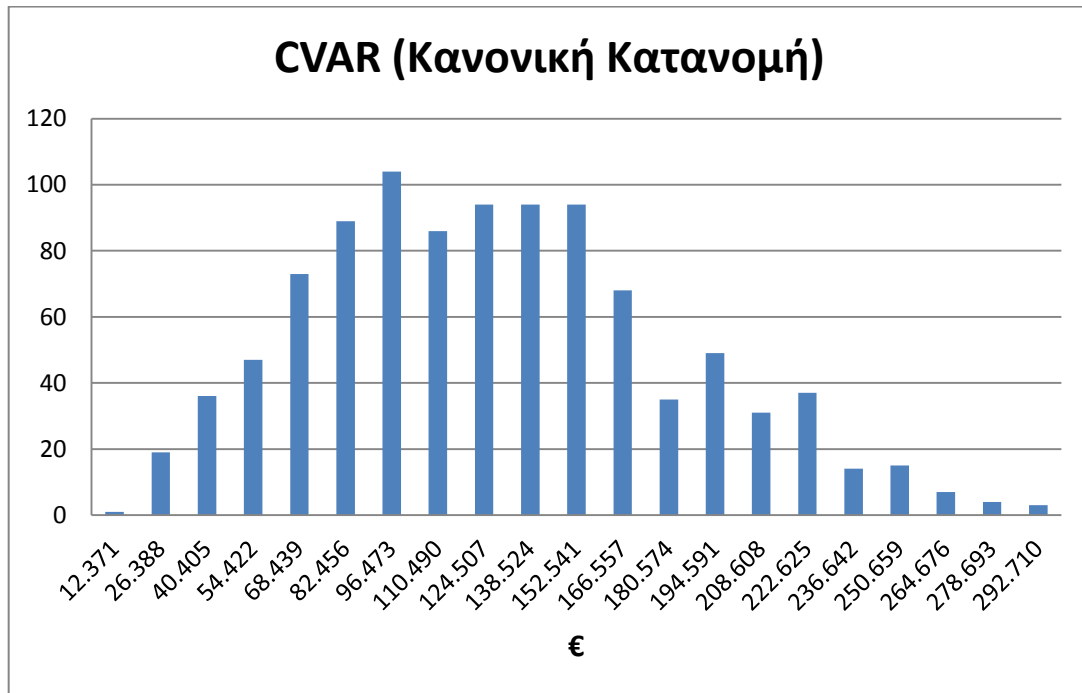


Σχήμα 6.11: Τιμές του σταθερού κόστους (CFIX) για κανονική κατανομή.

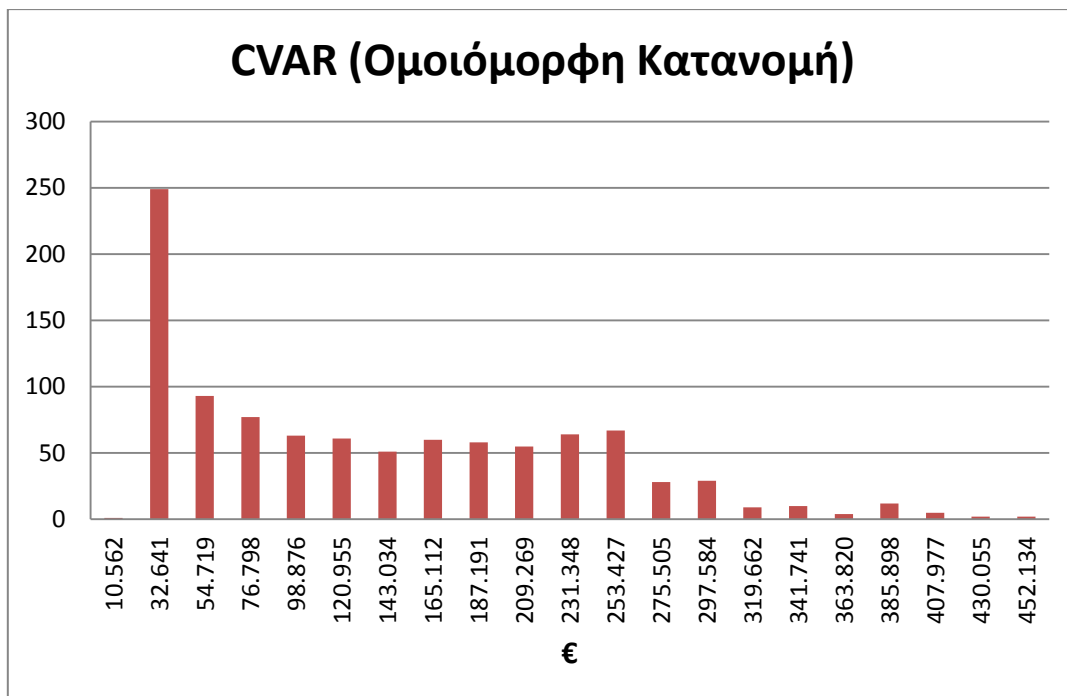


Σχήμα 6.12: Τιμές του σταθερού κόστους (CFIX) για ομοιόμορφη κατανομή.

Όπως παρατηρούμε για τα σταθερά κόστη και στις δύο περιπτώσεις των διαφορετικών κατανομών υπάρχει πολύ μικρή διασπορά τιμών κι επομένως έχουμε και μικρή αβεβαιότητα.

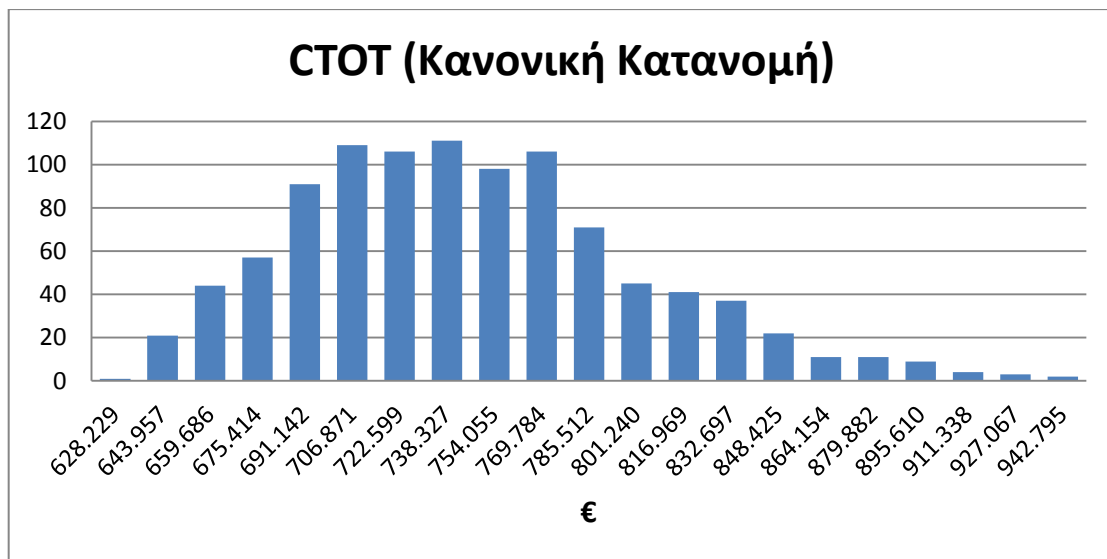


Σχήμα 6.13: Τιμές του ενεργειακού κόστους (CFIX) για κανονική κατανομή.

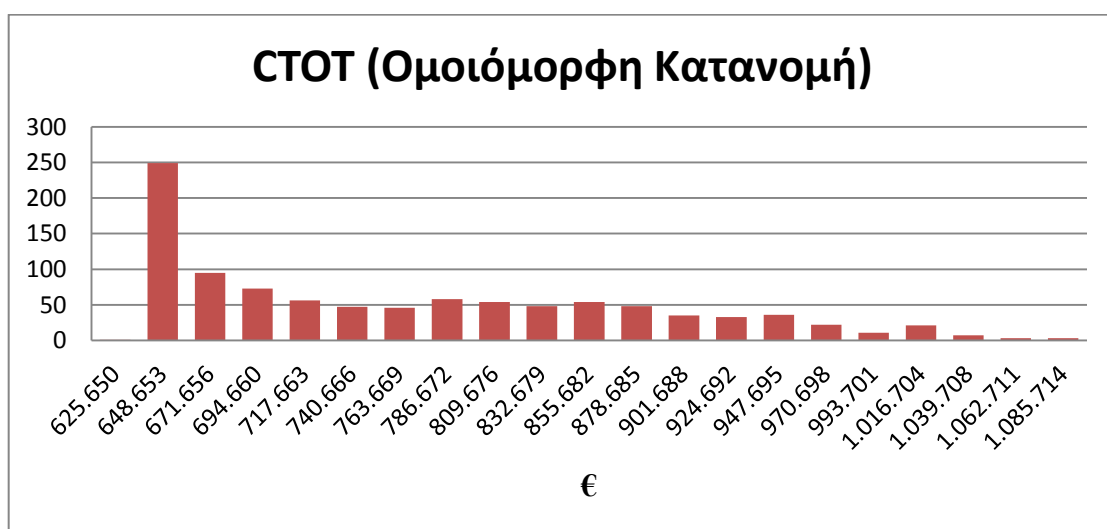


Σχήμα 6.14: Τιμές του ενεργειακού κόστους (CFIX) για ομοιόμορφη κατανομή.

Το ενεργειακό κόστος εμφανίζει ένα μια σημαντική διασπορά τιμών και στις δύο περιπτώσεις των διαφορετικών κατανομών όπως φαίνεται από τα Σχήματα 6.13 και 6.14. Μπορούμε όμως να πούμε πως στην περίπτωση της κανονικής κατανομής υπάρχει λιγότερη αβεβαιότητα για το ενεργειακό κόστος μιας και η πλειοψηφία των επαναλήψεων βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα τιμών. Το αντίθετο ισχύει για την περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής όπου το εύρος τιμών είναι μεγάλο κι επομένως υπάρχει αυξημένη αβεβαιότητα. Το γεγονός αυτό επηρεάζει σημαντικά το συνολικό κόστος το οποίο εξαρτάται κατά ένα μεγάλο βαθμό από το ενεργειακό κόστος και επομένως παρουσιάζει ανάλογη συμπεριφορά με αυτό όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.15 και 6.16.



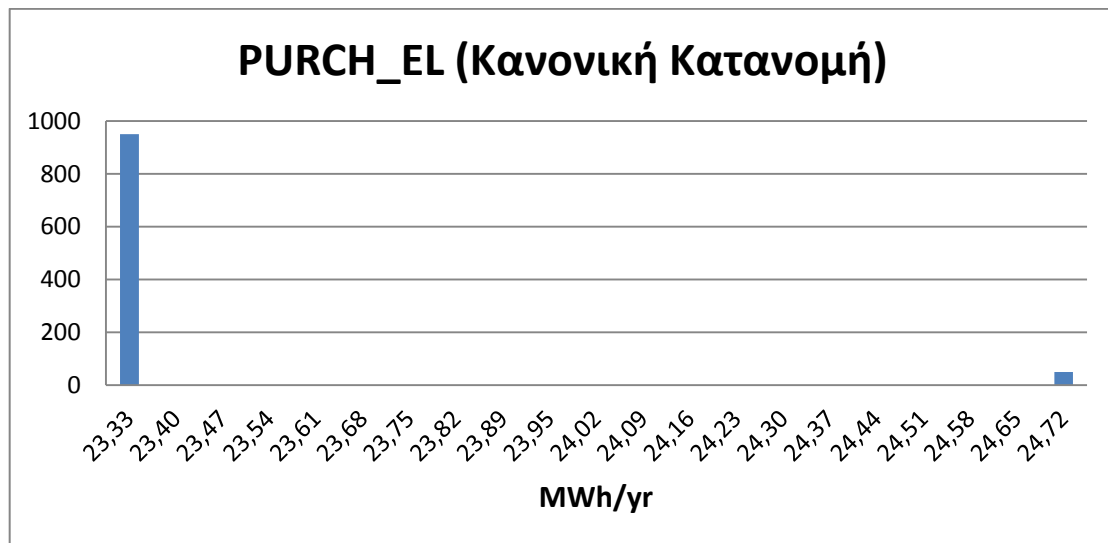
Σχήμα 6.15: Τιμές του συνολικού κόστους (CTOT) για κανονική κατανομή.



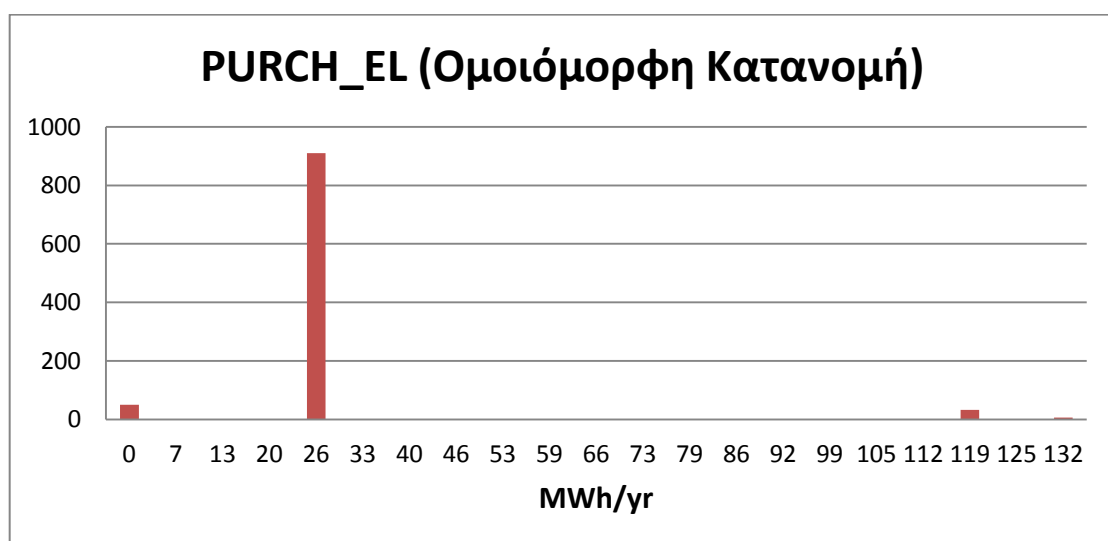
Σχήμα 6.16: Τιμές του ενεργειακού κόστους (CFIX) για ομοιόμορφη κατανομή.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το ενεργειακό κόστος σε αντίθεση με το σταθερό κόστος εξαρτάται άμεσα από τις παραμέτρους που έχουν οριστεί ως ευαίσθητες για την ανάλυση αυτή. Έτσι δικαιολογείται και η αβεβαιότητα των τιμών που παρουσιάζει το λειτουργικό κόστος σε σχέση με το σταθερό.

Σχετικά με την αγορά ηλεκτρικού ρεύματος (PURCH_EL), την πώληση ηλεκτρικού ρεύματος (SOLD_EL) και την κατανάλωση φυσικού αερίου (PURCH_NG) όπως φαίνεται στα Σχήματα 17-24 παρατηρούμε τα εξής: Για την αγορά του ηλεκτρικού ρεύματος και στις δύο περιπτώσεις των διαφορετικών κατανομών ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων τείνει σε μία συγκεκριμένη τιμή, άρα δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου αβεβαιότητα.

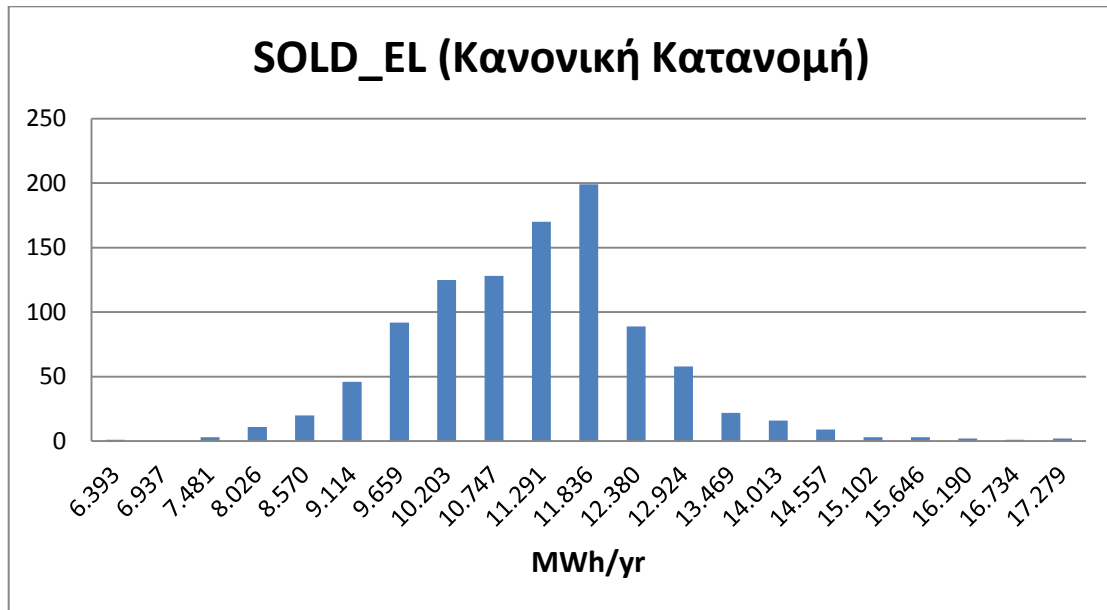


Σχήμα 6.17: Ποσότητες του αγοραζόμενου ηλεκτρικού ρεύματος (PURCH_EL) για κανονική κατανομή.

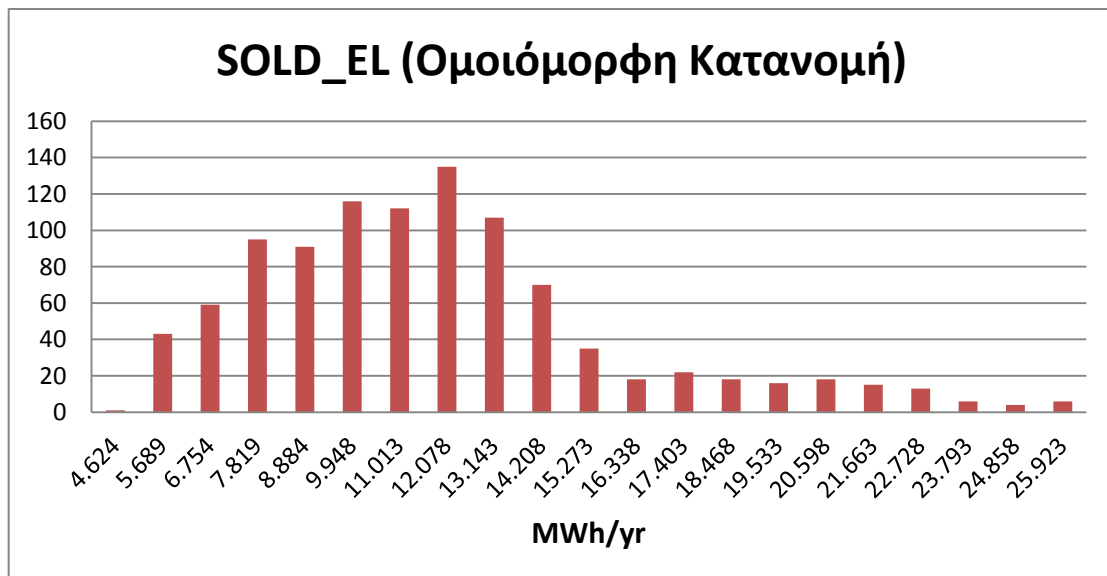


Σχήμα 6.18: Ποσότητες του αγοραζόμενου ηλεκτρικού ρεύματος (PURCH_EL) για ομοιόμορφη κατανομή.

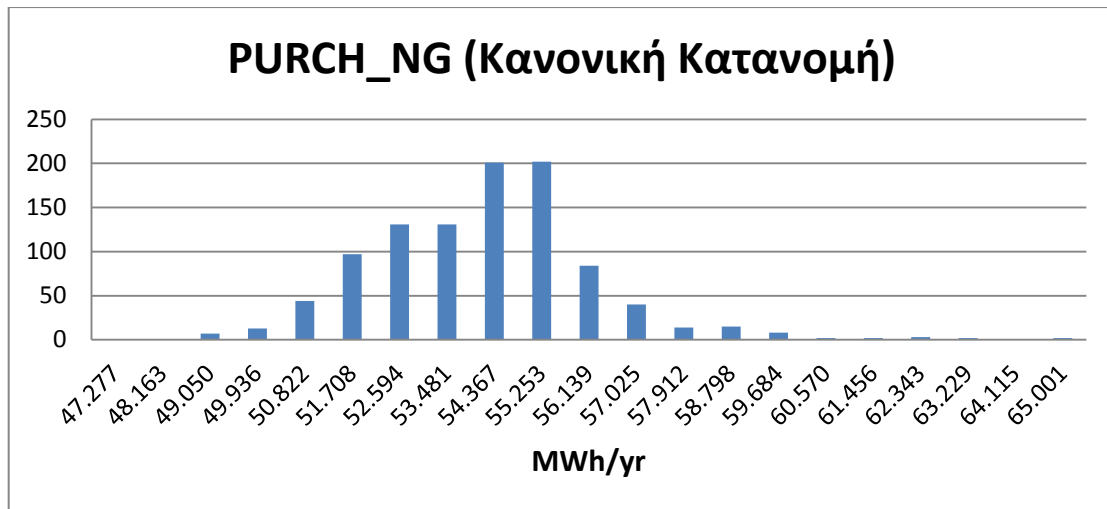
Για την πώληση ηλεκτρικού ρεύματος (SOLD_EL) και την κατανάλωση φυσικού αερίου (PURCH_NG) παρατηρούμε έντονη διασπορά τιμών και για τις δύο περιπτώσεις διαφορετικών κατανομών. Η διασπορά είναι ελαφρώς λιγότερη και συγκεντρωμένη σε ένα μικρότερο διάστημα τιμών για την περίπτωση της κανονικής κατανομής. Άρα για την κανονική κατανομή υπάρχει λιγότερη αβεβαιότητα σε σχέση με τις ποσότητες αγοράς ηλεκτρικού ρεύματος και την κατανάλωση φυσικού αερίου.



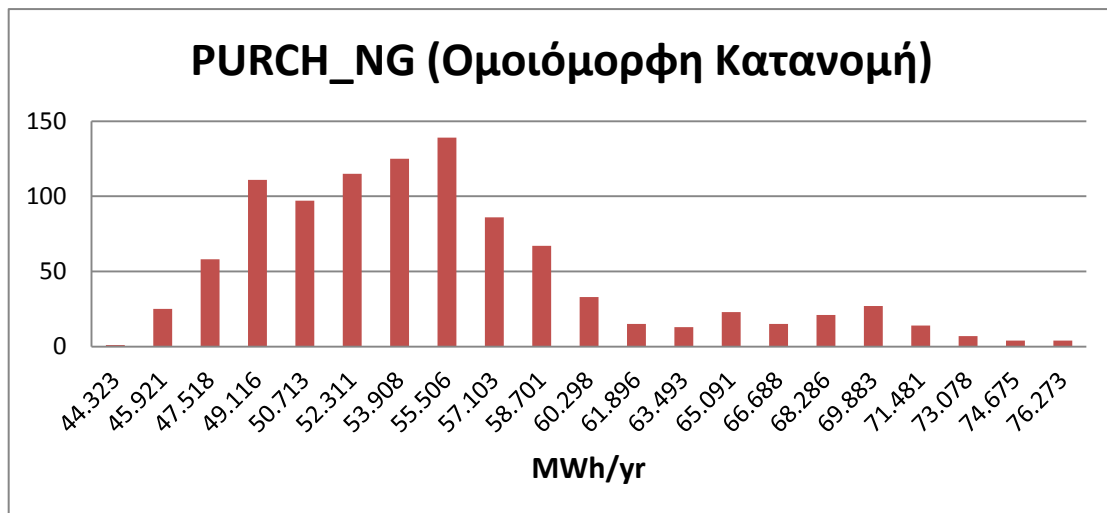
Σχήμα 6.19: Ποσότητες του πωλούμενου ηλεκτρικού ρεύματος (SOLD_EL) για κανονική κατανομή.



Σχήμα 6.20: Ποσότητες του πωλούμενου ηλεκτρικού ρεύματος (SOLD_EL) για ομοιόμορφη κατανομή.



Σχήμα 6.21: Ποσότητες κατανάλωσης φυσικού αερίου (PURCH_NG) για κανονική κατανομή.



Σχήμα 6.22: Ποσότητες κατανάλωσης φυσικού αερίου (PURCH_NG) για ομοιόμορφη κατανομή.

Μια σημαντική παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως θα περιμέναμε μια σχετική αβεβαιότητα στις ποσότητες αγοράς του ηλεκτρικού ρεύματος όπως παρατηρείται και με τις ποσότητες πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος αλλά και της αγοράς του φυσικού αερίου μιας και όλες εξαρτώνται από ευαίσθητες παραμέτρους. Κάτι τέτοιο όμως δεν συμβαίνει στην περίπτωση αγοράς ηλεκτρικού ρεύματος μιας και αυτή με βάση τις εξισώσεις του μοντέλου είναι προαιρετική. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι μια αβεβαιότητα στις τιμές αγοράς του ηλεκτρικού ρεύματος δεν μεταφράζεται αναγκαστικά σε αβεβαιότητα στην ποσότητα αγοράς του μιας και υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ελάχιστης ποσότητας αυτού και η κάλυψη του ενεργειακού ελλείμματος με αγορά φυσικού αερίου.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αφού παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα κι έγινε η επεξήγησή τους, είναι εύκολο να καταλήξουμε σε κάποια γενικά συμπεράσματα όσον αφορά την συμπεριφορά του μελετώμενου συστήματος.

Το πρώτο και σημαντικότερο συμπέρασμα της εργασίας αυτής είναι πως η ενσωμάτωση της δυνατότητας αποθήκευσης θερμότητας σε ένα σύστημα συμπαραγωγής κάποιας μεγάλης κτιριακής εγκατάστασης είναι μία ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή. Από οικονομική άποψη, αποτελεί μια επένδυση η οποία αποσβένει σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα και επομένως μακροπρόθεσμα βοηθάει στην εξοικονόμηση μεγάλου ποσού χρημάτων. Αυτό μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό παρατηρώντας την μείωση του ετήσιου συνολικού κόστους του συστήματος από 5,4% έως 7%. Από ενεργειακή άποψη, με την χρήση του συστήματος αυτού μειώνονται οι ενεργειακές ανάγκες της κτιριακής εγκατάστασης καθώς εξοικονομείται ενέργεια η οποία έμενε ανεκμετάλλευτη και απορριπτόταν στο περιβάλλον. Η μείωση του ετήσιου ενεργειακού κόστους του συστήματος από 11,2% έως 27% μας μαρτυρά το γεγονός αυτό. Επίσης από περιβαλλοντική άποψη, η μείωση των ενεργειακών αναγκών της κτιριακής εγκατάστασης, αυτόματα σημαίνει μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Τέλος, ακόμα και με την μείωση της απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας (αύξηση του συντελεστή απωλειών θερμότητας) το σύστημα αυτό υπερτερεί έναντι του συμβατικού στα παραπάνω κριτήρια.

Από την ανάλυση που έγινε, προκύπτει πως η προσθήκη της δυνατότητας αποθήκευσης θερμότητας στο σύστημα, αυξάνει σημαντικά τη δυνατότητα ικανοποίησης με οικονομικό τρόπο τυχόν φορτίων αιχμής χωρίς δυσανάλογη αύξηση της απαιτούμενης δυναμικότητας. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει καλύτερη δυνατότητα εξυπηρέτησης των ενεργειακών αναγκών σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν ακραίες ενεργειακές τιμές ζήτησης. Συνεπώς η αποθήκευση θερμότητας αποτελεί μία χρήσιμη επιλογή καθώς μπορεί να εξισορροπήσει αποτελεσματικά τον ετεροχρονισμό των φορτίων. Άμεση συνέπεια είναι και η δυνατότητα ελαχιστοποίησης του αριθμού των διαφόρων μονάδων που υπάρχουν στο σύστημα, η οποία, πέρα από την εξοικονόμηση που προσφέρει (μείωση του ετήσιου σταθερού κόστους από 5,4% έως 7%), σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επιθυμητή για διάφορους λόγους. Επίσης, η αποθηκευμένη θερμότητα λειτουργεί ως "ρεζέρβα" σε περιπτώσεις όπου κάποιες χρονικές στιγμές δεν είναι δυνατή η προμήθεια του συστήματος με ενέργεια.

Από την ανάλυση ευαισθησίας συμπεραίνουμε πως όση περισσότερη αβεβαιότητα υπάρχει στις ευαίσθητες μεταβλητές του συστήματος, τόσο πιο πολύ αβεβαιότητα υπάρχει στο ενεργειακό κόστος και άρα στο συνολικό κόστος. Όμως η αβεβαιότητα δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου τον αριθμό των μονάδων του συστήματος καθώς και τις ενεργειακές χωρητικότητες των αποθηκευτικών χώρων της θερμικής και της ψυκτικής ενέργειας. Αυτό είναι κάτι που είναι πολύ σημαντικό καθώς έτσι δεν απαιτείται επανασχεδιασμός του συστήματος και επανατοποθέτηση μηχανημάτων στις εγκαταστάσεις της εφαρμογής σε περίπτωση ύπαρξης οποιασδήποτε αβεβαιότητας.

Συνεχίζοντας, πρέπει να πούμε πως το σύστημα συμπαραγωγής όπως είναι δομημένο, προσφέρει δυνατότητα επιλογής ανάμεσα στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και την κατανάλωση θερμότητας (η οποία προέρχεται από το φυσικό αέριο). Συνεπώς σε περίπτωση αβεβαιότητας στις τιμές αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει η επιλογή της χρήσης θερμότητας για την εξυπηρέτηση των αναγκών, η οποία και εξαλείφει την επιρροή της αβεβαιότητας στο συνολικό κόστος. Στην μελέτη αυτή, προέκυψε πως η προσθήκη της δυνατότητας αποθήκευσης θερμότητας βοηθάει ακόμα περισσότερο στην εξάλειψη της αβεβαιότητας αυτής μιας και αυξάνεται η διαθεσιμότητα της θερμικής ενέργειας του συστήματος.

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί πως από την γενικότερη μελέτη του συστήματος, έρχεται στην επιφάνεια η σημασία της εφαρμογής του γραμμικού προγραμματισμού στην ανάλυση και βελτιστοποίηση ενεργειακών και οικονομικών εφαρμογών. Ιδιαίτερα ο μικτός αέριος γραμμικός προγραμματισμός αποδείχθηκε ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο προς την κατεύθυνση αυτή καθώς αποτέλεσε έναν απλό, κατανοητό και γρήγορο τρόπο που βοήθησε στην μελέτη και άρα στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το σύστημά μας. Ενεργό ρόλο έπαιξε και το περιβάλλον "GAMS", το οποίο αποδείχθηκε ένα ιδανικό πρόγραμμα που βοήθησε σημαντικά στην εύκολη την εφαρμογή του γραμμικού προγραμματισμού στο σύστημά μας.

Τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής για την συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης δεν συνίσταται να γενικευτούν για την εφαρμογή της αποθήκευσης θερμότητας σε όλες τις περιπτώσεις. Για παράδειγμα, όπως φάνηκε, η αποθήκευση θερμότητας είναι ιδιαίτερα συμφέρουσα για μεγάλης κλίμακας κτιριακές εγκαταστάσεις που λειτουργούν με σύστημα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Κάτι τέτοιο όμως δεν ξέρουμε αν ισχύει σε μικρής κλίμακας κτίρια όπως πχ μια πολυκατοικία. Επίσης θα ήταν ενδιαφέρον να ερευνηθεί ο ρόλος της αποθήκευσης θερμότητας σε περιπτώσεις και εφαρμογές στις οποίες δεν χρησιμοποιείται σύστημα συμπαραγωγής. Ακόμα θα μπορούσαν να εξεταστούν περισσότερες αβέβαιες μεταβλητές στην ανάλυση ρίσκου όπως για παράδειγμα, οι

τιμές των δεδομένων ενεργειακής ζήτησης, ώστε να υπάρχει μια συνολικότερη εκτίμηση της αβεβαιότητας που εμπεριέχει το σύστημα.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Miguel A. Lozano, Jose C. Ramos, Luis M. Serra, Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints, *Energy* 35 (2010) 794–805
- [2] Iyer, R.R. and Grossmann, "Synthesis and operational planning of utility systems for multiperiod operation, *Computers and Chemical Engineering* 22 (7-8), 979-993
- [3] George Mavrotas, Danae Diakoulaki, Kostas Florios, Paraskevas Georgiou, A mathematical programming framework for energy planning in services' sector buildings under uncertainty in load demand: The case of a hospital in Athens, *Energy Policy* 36 (2008) 2415–2429
- [4] George Mavrotas, Kostas Florios, Dimitra Vlachou, Energy planning of a hospital using Mathematical Programming and Monte Carlo simulation for dealing with uncertainty in the economic parameters, *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 722–731
- [5] Mohammad Saad Al-Homoud, Computer-aided building energy analysis techniques, *Building and Environment* 36 (2001) 421±433
- [6] Ibrahim Dincer and Marc A. Rosen, *Thermal Energy Storage Systems & Applications*, Second Edition
- [7] ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Αποθήκευση Θερμότητας, Εργαστήριο ηλιακών και άλλων ενεργειακών συστημάτων, 2009Ε
- [8] Φαράο Βασιλική, Διπλωματική εργασία: Μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και εφαρμογή στη διεποχιακή αποθήκευση στην περιοχή της Αθήνας, Αθήνα 2006
- [9] John A. Duffie and William A. Beckman, *Solar Engineering of thermal processes*, Second Edition
- [10] K.A.R. Ismail, R. Stuginsky Jr., A parametric study on possible bed models for pcm and sensible heat storage, *Applied Thermal Engineering* 19 (1999) 757-788
- [11] Bjornar SAndnes, *Exergy Efficient Production, Storage and Distribution of Solar Energy*
- [12] R. Parameshwarana, S. Kalaiselvamb, S. Harikrishnanb, A. Elayaperumala, Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 2394– 2433

- [13] Lane G.A., Low temperature Heat Storage with Phase change Materials Int.J. Energy Res., 55-60 (1980)
- [14] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 318–345
- [15] High temperature thermal energy storage systems based on latent and thermo-chemical heat storage
- [16] K.Kaygusuz, Phase Change Energy Storage for Solar Heating Systems, Energy Sources, 25:791-807, (2003)
- [17] Ali H. Abedin and Marc A. Rosen, A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems, The Open Renewable Energy Journal, 2011, 4, 42-46
- [18] Δημήτρης Δεσπότης, Γραμμικός Προγραμματισμός, Πειραιάς 2007
- [19] Μανασίδης Οδυσσέας, Διπλωματική εργασία: Αλγόριθμος Simplex και ειδικές μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού με χρήση Η/Υ, Ξάνθη 2010
- [20] Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Εισαγωγή στην Επιχειρησιακή Έρευνα - Γραμμικός Προγραμματισμός, Αθήνα 2006
- [21] Σίσκος Ελευθέριος, Ανάπτυξη μοντέλου Μαθηματικού Προγραμματισμού για την προσομοίωση επιχειρηματικών αποφάσεων με έμφαση στην αντιμετώπιση της αβεβαιότητας, 2011
- [22] Παπαθανάση Αγλαΐα, Η εφαρμογή της μεθόδου Augmecon για την παραγωγή των κατά Pareto άριστων λύσεων σε προβλήματα Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού, 2010

9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω παρατείνεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο περιβάλλον GAMS:

```

$ontext
apartments in Zaragosa (Spain)
$offtext
$ eolcom //

sets
d set of typical days - one per month /1*12/
h set of periods per day - one for each hour /1*24/
*peloffpeak(h) off peak hours for purchasing electricity /1*7/
*pelnormal(h) normal hours for purchasing electricity /8*12, 16*18, 21*24/
*pelpeak(h) peak hours for purchasing electricity /13*15, 19*20/
peloffpeak(h) off peak hours for purchasing electricity /2*6/ // from figure 8
pelnormal(h) normal hours for purchasing electricity /1, 7*9, 23*24 /
pelpeak(h) peak hours for purchasing electricity /10*22/

parameter nd(d) Number of d type days per year
/
1 31
2 28
3 31
4 30
5 31
6 30
7 31
8 31
9 30
10 31
11 30
12 31
/
;

table DSHW(h,d) demand for sanitary water
      1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12
1  350 367 366 335 301 273 171 100 241 316 376 379
2  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
3  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
4  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
5  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
6  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
7  450 411 358 287 226 180 98 50 142 218 306 364
8  900 860 788 666 555 469 274 150 396 569 750 845
9  1350 1310 1218 1045 883 757 449 250 648 916 1186 1314
10 1800 1798 1720 1515 1315 1156 702 400 1003 1370 1711 1824

```

```

11 1400 1351 1250 1067 897 765 452 250 652 929 1212 1353
12 1050 984 884 731 596 492 281 150 405 597 805 928
13 700 656 589 488 397 328 187 100 270 398 537 618
14 1400 1335 1222 1030 856 722 421 230 608 876 1157 1307
15 1250 1150 1011 818 651 523 290 150 419 635 880 1038
16 1050 984 884 731 596 492 281 150 405 597 805 928
17 750 691 610 495 395 318 177 92 256 386 533 628
18 1050 1007 927 786 657 558 327 180 473 677 889 997
19 1300 1291 1229 1078 931 815 494 280 706 969 1219 1308
20 1600 1632 1592 1428 1260 1125 693 400 984 1317 1607 1670
21 1300 1291 1229 1078 931 815 494 280 706 969 1219 1308
22 1080 1032 946 799 666 562 329 180 475 683 900 1014
23 879 835 761 639 528 443 257 140 372 538 714 810
24 700 656 589 488 397 328 187 100 270 398 537 618

```

;

table DQ(h,d) demand for heating space

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
|----|-------|-------|------|------|---|---|---|---|---|----|------|------|-------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 6 | 14300 | 11044 | 6854 | 2365 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1288 | 8523 | 16354 |
| 7 | 13700 | 10581 | 6567 | 2266 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1234 | 8165 | 15668 |
| 8 | 13100 | 10118 | 6279 | 2166 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1180 | 7808 | 14982 |
| 9 | 12500 | 9654 | 5991 | 2067 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1126 | 7450 | 14295 |
| 10 | 11900 | 9191 | 5704 | 1968 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1072 | 7093 | 13609 |
| 11 | 11300 | 8727 | 5416 | 1869 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1018 | 6735 | 12923 |
| 12 | 10700 | 8264 | 5129 | 1770 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 964 | 6377 | 12237 |
| 13 | 10100 | 7801 | 4841 | 1670 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 910 | 6020 | 11551 |
| 14 | 9500 | 7337 | 4553 | 1571 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 856 | 5662 | 10865 |
| 15 | 8900 | 6874 | 4266 | 1472 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 802 | 5305 | 10178 |
| 16 | 8300 | 6410 | 3978 | 1373 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 748 | 4947 | 9492 |
| 17 | 12800 | 9886 | 6135 | 2117 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1153 | 7629 | 14638 |
| 18 | 11977 | 9250 | 5741 | 1981 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1079 | 7138 | 13697 |
| 19 | 10200 | 7878 | 4889 | 1687 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 919 | 6079 | 11665 |
| 20 | 10200 | 7878 | 4889 | 1687 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 919 | 6079 | 11665 |
| 21 | 7500 | 5793 | 3595 | 1240 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 676 | 4470 | 8577 |
| 22 | 9500 | 7337 | 4553 | 1571 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 856 | 5662 | 10865 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

;

table DF(h,d) demand for cooling load

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|------|-------|-------|------|---|---|---|
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2618 | 7395 | 5500 | 2246 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3379 | 9547 | 7100 | 2899 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4093 | 11564 | 8600 | 3511 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6806 | 19228 | 14300 | 5838 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9518 | 26893 | 20000 | 8166 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7853 | 22186 | 16500 | 6737 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3331 | 9412 | 7000 | 2858 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2855 | 8068 | 6000 | 2450 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2284 | 6454 | 4800 | 1960 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2284 | 6454 | 4800 | 1960 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1662 | 4697 | 3493 | 1426 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

;

SCALARS

*DIAFORA DEDOMENA

fam Function of annual amortization factor (yr-1) /0.1/
nbig Large integer number /100000000/
rbig Large real number /100000000/

*COST AND PRICE OF ENERGY FLOWS

cf Natural gas price (euro per kWh)
cqref Rejected heat(euro per kWh) /0.0003/
cecoff Purchased electricity off peak hours price (euro per kWh)
cecnormal Purchased electricity normal hours price (euro per kWh)
cecppeak Purchased electricity peak hours price (euro per kWh)
*cevanight Sold electricity feed-in tariff price scenario A 0-8h (euro per kWh) /0.045/
*cevaday Sold electricity feed-in tariff price scenario A 8-24h (euro per kWh) /0.068/
*cevb Sold electricity feed-in tariff price scenario B (euro per kWh) /0.059/
cevc Sold electricity feed-in tariff price scenario C (euro per kWh)

*TECHNICAL AND ECONOMIC DATA OF EQUIPMENT

*Cogeneration modules(mc)
wmnom Nominal power (kW) /2928/
rfw Fuel to power ration /2.390/
rqg Heat of gases per work /0.567/
rqc Heat of jackets per work /0.376/
rqo Heat of oil per work /0.111/
imc Investment (euros) /2342400/

*Boilers(aux)

qauxnom Nominal power (kW) /4070/

rqf Efficiency /0.905/

iaux Investment (euros) /162800/

*Vapor compression refrigerator(mf)

rmfnom Nominal power (kW) /4220/

copmf Coefficient of performance /4.02/

imf Investment (euros) /422000/

*Absorption refrigerators(abs)

rabsnom Nominal power (kW) /2112/

copabs Coefficient of performance /0.7/

iabs Investment (euros) /264000/

*Cooling towers(tr)

qrefnom Nominal power (kW) /8000/

itr Investment (euros) /144000/

*Heat storage(ACUc)

iuc Unit cost (euros per kWh) /26/

fperc Loss factor (h-1) /0.10/

*Cold storage(ACUf)

iuf Unit cost (euros per kWh) /48/

fperf Loss factor (h-1) /0.10/

parameter cec(h) cost of purchased electricity ;

*cec(peloffpeak)=cEcoff;

*cec(pelnormal)=cEcnormal;

*cec(pelpeak)=cEcpeak;

*cec(h)=cEcnormal;

BINARY VARIABLES

YMC Possibility of cogeneration

YVE(d,h) Possibility of electricity sales

INTEGER VARIABLES

NMCOPE(d,h) Number of cogeneration modules in operation

T(d,h) Annual operational hours for hth sampling time on the dth representative day

NABS Number of absorption refrigerators

NAUX Number of auxiliary boilers

NMC Number of cogeneration modules

NMF Number of vapor compression refrigerators

NTR Number of cooling towers

POSITIVE VARIABLES

ACUCINS Capacity of thermal energy storage system (heat kWh)
 ACUFINS Capacity of thermal energy storage system (cold kWh)
 CE(d,h) Hourly energy charge (kW)
 ACUC(d,h) Thermal energy stored (heat kWh)
 ACUF(d,h) Thermal energy stored (cold kWh)
 CARC(d,h) Thermal energy stored (heat kW)
 CARF(d,h) Thermal energy stored (cold kW)
 CFIX Annual fixed cost (V per yr)
 CVAR Annual energy cost (V per yr)
 DESC(d,h) Thermal energy discharged (heat kW)
 DESF(d,h) Thermal energy discharged (cold kW)
 EC(d,h) Purchased electricity (kW)
 EV(d,h) Sold electricity (kW)
 FAUX(d,h) Auxiliary boiler fuel (kW)
 FM(d,h) Cogeneration module fuel (kW)
 PERC(d,h) Thermal energy lost (heat kW)
 PERF(d,h) Thermal energy lost (cold kW)
 QABS(d,h) Heat to absorption refrigerator (kW)
 QABSD(d,h) Heat loss in absorption refrigerator (kW)
 QAUX(d,h) Heat from auxiliary boiler (kW)
 QC(d,h) Cogenerated heat from jacket (kW)
 QCA(d,h) Used cogenerated heat from jacket (kW)
 QCAT(d,h) Heat supplied to consumers (kW)
 QCD(d,h) Cogenerated heat loss from jacket (kW)
 QG(d,h) Cogenerated heat from gases (kW)
 QGA(d,h) Used cogenerated heat from gases (kW)
 QGD(d,h) Cogenerated heat loss from gases (kW)
 QMFD(d,h) Heat loss in compression refrigerator (kW)
 QO(d,h) Cogenerated heat from lube oil (kW)
 QOA(d,h) Used cogenerated heat from lube oil (kW)
 QOD(d,h) Cogenerated heat loss from lube oil (kW)
 QREF(d,h) Heat dissipated in cooling tower (kW)
 RABS(d,h) Cooling from absorption refrigerator (kW)
 RMF(d,h) Cooling from compression refrigerator (kW)
 WM(d,h) Cogenerated electricity (kW)
 WMF(d,h) Work supplied to compression refrigerator (kW)

FREE VARIABLES

CTOT annual cost (euros)

EQUATIONS

-----ORISMOS EKSISOSEON-----

*Objective function

E_COST Equation of total annual cost
 E_CFIX Equation of annual fixed cost
 E_CVAR Equation of annual energy cost
 E_CE(d,h) Equation of hourly energy charge

*Cogeneration modules

BAL_WM(d,h) Balance for cogenerated electricity
BAL_FM(d,h) Balance for cogeneration module fuel
BAL_QG(d,h) Balance for cogenerated heat from gases
BAL_QC(d,h) Balance for cogenerated heat from jacket
BAL_QO(d,h) Balance for cogenerated heat from lube oil

*Boilers

BAL_QAUX(d,h) Balance for heat from auxiliary boiler
BAL_FAUX(d,h) Balance for auxiliary boiler fuel

*Vapor compression refrigerators

BAL_RMF(d,h) Balance for cooling compression refrigerator
BAL_WMF(d,h) Balance for work supplied to compression refrigerator

*Absorption refrigerators

BAL_RABS(d,h) Balance for cooling from absorption refrigerator
BAL_QABS(d,h) Balance for heat to absorption refrigerator

*Cooling Towers

BAL_QREF(d,h) Balance for heat dissipated in cooling tower

*Energy Balances

E_18(d,h) Equation of balance for cogenerated heat from gases
E_19(d,h) Equation of balance for cogenerated heat from jacket
E_20(d,h) Equation of balance for cogenerated heat from lube oil
E_21(d,h) Equation of balance for compression refrigerator
E_22(d,h) Equation of balance for absorption refrigerator
E_23(d,h) Equation of balance for used cogenerated heat
E_24(d,h) E 24
E_25(d,h) E 25
E_26(d,h) E 26
E_27(d,h) E 27

*Heat storage

BAL_ACUC(d,h) Balance of thermal energy stored (heat)
E_29(d,h) Equation of balance for thermal energy lost (heat)
E_30(d) Equation of balance for thermal energy stored when $h=1$ (heat)
E_31(d,h) Equation of balance for thermal energy stored when $h>1$ (heat)

*Cold storage

BAL_ACUF(d,h) Balance of thermal energy stored (cold)
E_33(d,h) Equation of balance for thermal energy lost (cold)
E_34(d) Equation of balance for thermal energy stored when $h=1$ (cold)
E_35(d,h) Equation of balance for thermal energy stored when $h>1$ (cold)
*E_40(d,h) E 40
E_41(d,h) Not selling when purchasing electricity eq.1
E_42(d,h) Not selling when purchasing electricity eq.2
*E_43(d,h) E 43
*E_44(d,h) E 44

;

*-----PERIGRAFI EKSIKSI-----

*Objective function

E_COST.. CTOT=e=CFIX+CVAR;

E_CFIX..

CFIX=e=fam*(imc*NMC+iaux*NAUX+imf*NMF+iabs*NABS+itr*NTR+iuc*ACUCINS+iuf*ACUFI
NS);

E_CVAR.. CVAR=e=sum(d, sum(h, CE(d,h)*ND(d)));

E_CE(d,h).. CE(d,h)=e=cf*(FM(d,h)+FAUX(d,h))+cqref*QREF(d,h)+cec(h)*EC(d,h)-
cevc*EV(d,h);

* cecoffpeak*EC(d,peloffpeak)+cecpeak*EC(d,pepeak)

*Cogeneration modules

BAL_WM(d,h).. WM(d,h)=l=NMC*wmnom;

BAL_FM(d,h).. FM(d,h)=e=rw*WM(d,h);

BAL_QG(d,h).. QG(d,h)=e=rqg*WM(d,h);

BAL_QC(d,h).. QC(d,h)=e=rqc*WM(d,h);

BAL_QO(d,h).. QO(d,h)=e=rqo*WM(d,h);

*Boilers

BAL_QAUX(d,h).. QAUX(d,h)=l=NAUX*qauxnom;

BAL_FAUX(d,h).. FAUX(d,h)=e=QAUX(d,h)/rqf;

*Vapor compression refrigerators

BAL_RMF(d,h).. RMF(d,h)=l=NMF*rmfnom;

BAL_WMF(d,h).. WMF(d,h)=e=RMF(d,h)/copmf;

*Absorption refrigerators

BAL_RABS(d,h).. RABS(d,h)=l=NABS*rabsnom;

BAL_QABS(d,h).. QABS(d,h)=e=RABS(d,h)/copabs;

*Cooling Towers

BAL_QREF(d,h).. QREF(d,h)=l=NTR*qrefnom;

*Energy Balances

E_18(d,h).. QG(d,h)=e=QGD(d,h)+QGA(d,h);

E_19(d,h).. QC(d,h)=e=QCD(d,h)+QCA(d,h);

E_20(d,h).. QO(d,h)=e=QOD(d,h)+QOA(d,h);

E_21(d,h).. QMFD(d,h)=e=WMF(d,h)+RMF(d,h);

E_22(d,h).. QABSD(d,h)=e=QABS(d,h)+RABS(d,h);

E_23(d,h).. QGA(d,h)+QCA(d,h)+QAUX(d,h)=e=QABS(d,h)+QCAT(d,h);

E_24(d,h).. QCAT(d,h)+QOA(d,h)+DESC(d,h)=e=CARC(d,h)+DQ(h,d)+DSHW(h,d);

E_25(d,h).. RMF(d,h)+RABS(d,h)+DESC(d,h)=e=CARF(d,h)+DF(h,d);

E_26(d,h).. QCD(d,h)+QOD(d,h)+QMFD(d,h)+QABSD(d,h)=e=QREF(d,h);

E_27(d,h).. EC(d,h)+WM(d,h)=e=EV(d,h)+WMF(d,h);

*Heat storage

BAL_ACUC(d,h).. ACUC(d,h)=l=ACUCINS;

E_29(d,h).. PERC(d,h)=e=fperc*ACUC(d,h);

E_30(d).. ACUC(d,'1')-ACUC(d,'24')=e=(CARC(d,'1')-DESC(d,'1')-PERC(d,'1'));

E_31(d,h)\$ (ord(h)>1).. ACUC(d,h)-ACUC(d,h-1)=e=(CARC(d,h)-DESC(d,h)-PERC(d,h)) ;

*Cold storage

BAL_ACUF(d,h).. ACUF(d,h)=l=ACUFIns;

E_33(d,h).. PERF(d,h)=e=fperf*ACUF(d,h) ;

E_34(d).. ACUF(d,'1')-ACUF(d,'24')=e=(CARF(d,'1')-DESCF(d,'1')-PERF(d,'1'));

E_35(d,h)\$ (ord(h)>1).. ACUF(d,h)-ACUF(d,h-1)=e=(CARF(d,h)-DESCF(d,h)-PERF(d,h));

*E_40(d,h)..NMC=l=YMC*nbig

E_41(d,h).. EV(d,h) =l= YVE(d,h)*rbig ;

E_42(d,h).. EC(d,h) =l= (1-YVE(d,h))*rbig ;

*E_43(d,h)..WM(d,h)=e=NMCOPE(d,h)*wmnom

*E_44..NMCOPE(d,h)=l=NMC

*NMC.FX=0;

*NABS.FX=0;

*ACUCINS.FX=0;

*ACUFINS.FX=0;

model LOZANO_APPARTMENTS /all/ ;

option limrow=10;

option optcr=0.000;

*NMC.fx=0;

*ACUCINS.fx=0;

*ACUFINS.fx=0;

File fx / Lozano_Serra_out.txt /;

scalar

mciter, start, finish,purch_el, sold_el, purch_ng

MCitermax /1/

;

put fx ' * NABS NAUX NMC NMF NTR ACUCINS ACUFINS CFIX CVAR
CTOT PURCH_EL SOLD_EL PURCH_NG'/;

*Monte Carlo

start=jnow;

option seed=1513;

for (mciter=1 to MCitermax,

* random generation of return and profit from normal distributions

cf = 0.014;

cecoff = 0.038;


```

cecnormal = 0.066;
cecpeak = 0.112;
cevc = 0.059;

$ontext
cf = normal(0.014,0.002);
cecoff = normal(0.038,0.003);
cecnormal = normal(0.066,0.004);
cecpeak = normal(0.112,0.007);
cevc = normal(0.059,0.003);
$offtext

*cf = uniform(0.007,0.021); //0.014
*cecoff = uniform(0.028,0.048); //0.038;
*cecnormal = uniform(0.054,0.078); //0.066;
*cecpeak = uniform(0.092,0.132); //0.112;
*cevc = uniform(0.049,0.069); //0.059;

cec(peloffpeak)=cEcoff;
cec(pelnormal)=cEcnormal;
cec(pelpeak)=cEcpeak;
solve LOZANO_APPARTMENTS using MIP minimizing CTOT;
purch_el=sum((d,h),nd(d)*EC.L(d,h));
sold_el=sum((d,h),nd(d)*EV.L(d,h));
purch_ng=sum((d,h),nd(d)*(FAUX.L(d,h)+FM.L(d,h)));

put mciter:5:0,
NABS.L:10:0,NAUX.L:10:0,NMC.L:10:0,NMF.L:10:0,NTR.L:10:0,ACUCINS.L:10:1,ACUFINS.L:10:
1,CFIX.L:10:0,CVAR.L:10:0,CTOT.L:10:0,purch_el:10:0,sold_el:10:0,purch_ng:10:0 /;
); // for loop

finish=jnow;
putclose fx;

```